This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

Library
of the
University of Wisconsin

CHIMIE ET PHYSIQUE

APPLIQUÉES

AUX TRAVAUX PUBLICS

TOURS. — IMPRIMERIE DESLIS FRÈRES

BIBLIOTHÈQUE DU CONDUCTEUR DE TRAVAUX PUBLICS

CHIMIE ET PHYSIQUE

APPLIQUÉES

AUX TRAVAUX PUBLICS

(ANALYSES ET ESSAIS DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION)

PAR

J. MALETTE, ✪ A., ✱ M. A.

Conducteur des Ponts et Chaussées
Chimiste à l'École nationale des Ponts et Chaussées
Chef de laboratoire à l'École spéciale de Travaux Publics

PARIS
H. DUNOD ET E. PINAT, ÉDITEURS
49, Quai des Grands-Augustins, 49

1906

110901
007
SDK
.M29

G31377

BIBLIOTHÈQUE DU CONDUCTEUR DE TRAVAUX PUBLICS

PUBLIÉE SOUS LES AUSPICES

DE MESSIEURS LES MINISTRES DES TRAVAUX PUBLICS DE L'AGRICULTURE, DU COMMERCE ET DE L'INDUSTRIE DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE, DE LA JUSTICE DE L'INTÉRIEUR, DE LA GUERRE, DES COLONIES

Comité de patronage

BARTHOU	Ministre des Travaux publics, des Postes et Telegraphes et ancien ministre de l'Intérieur.
BECHMANN	Directeur honoraire des eaux et de l'assainissement de la ville de Paris, Professeur à l'Ecole des Ponts et Chaussées.
BERTEAUX	Ancien Ministre de la Guerre, Membre de la Chambre des députés.
BOREUX	Directeur de la voie publique et de l'eclairage de la ville de Paris.
BOSRAMIER	Ingénieur aux. des Ponts et Chaussees en retraite.
BOUQUET	Directeur du personnel et de l'enseignement technique au Ministère du Commerce et de l'Industrie.
BOURRAT	Membre de la Chambre des députes.
BOUVARD	Directeur administratif des services d'architecture, des promenades et plantations de la ville de Paris.
CLAVEILLE	Directeur du Personnel et de la Comptabilité Ministère des Travaux publics.
COLSON	Conseiller d'Etat, Professeur à l'Ecole des Ponts et Chaussées.
COMTE (J.)	Ancien directeur des Bâtiments civils et des Palais nationaux.
DEBAUVE	Inspecteur de l'Ecole des Ponts et Chaussées.
DEFRANCE	Directeur des affaires départementales de la Seine.
DELECROIX	Docteur en droit, Directeur de la *Revue de la Legislation des Mines*.
Le **Directeur** de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées.	
Le **Directeur** de l'Ecole nationale supérieure des Mines.	
DONIOL	Inspecteur général des Ponts et Chaussees en retraite.
BOUSQUET (du)	Ingénieur en chef du matériel et de la traction a la Cie des Chemins de fer du Nord
EYROLLES	Directeur de l'Ecole speciale de Travaux publics.
FLAMANT	Inspecteur général des Ponts et Chaussees.
Dr GAUTHIER (de l'Aude)	Ancien Ministre des Travaux publics.
GERVAIS	Membre de la Chambre des députes.
GRILLOT	President honoraire de l'Association des personnels de travaux publics.

GUILLAIN	Ancien Ministre des Colonies, Membre de la Chambre des députés.
GUYOT-DESSAIGNE	Ancien Ministre de la Justice et des Travaux publics, Membre de la Chambre des députés.
HATON DE LA GOUPILLIÈRE	Membre de l'Institut, Inspecteur general des Mines en retraite.
HENRY (E.)	Inspecteur général des Ponts et Chaussées, Président du Conseil de la vicinalité au Ministère de l'Intérieur.
HUET	Inspecteur général des Ponts et Chaussees en retraite.
LAUSSEDAT (le Colonel)	Membre de l'Institut, Directeur honoraire du Conservatoire national des Arts et Métiers.
Me LE BERQUIER	Avocat à la Cour d'appel de Paris.
LOUIS MARTIN	Avocat, Professeur libre de droit, Membre de la Chambre des députés.
MAGNIN	Ancien Ministre de l'Agriculture, du Commerce et des Finances, Sénateur inamovible.
MARTINIE	Contrôleur général de l'Administration de l'Armee.
PHILIPPE	Directeur honoraire de l'Hydraulique agricole au Ministère de l'Agriculture.
PILLET	Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers.
PIOT	Sénateur, ancien Entrepreneur de Travaux publics.
PONTICH (de)	Directeur des Travaux de Paris.
Le **Président** de l'Association philotechnique.	
Le **Président** de l'Association polytechnique.	
Le **Président** de la Société des Anciens Élèves des Ecoles d'Arts et Métiers.	
Le **Président** de l'Association des personnels de travaux publics.	
Le **Président** de la Société des Ingenieurs civils de France.	
Le **Président** de la Société des Ingénieurs coloniaux.	
Le **Président** de la Société de Topographie de France.	
Le **Président** de la Société de Topographie parcellaire de France.	
QUENNEC	Directeur de l'Octroi de Paris.
RÉSAL	Professeur a l'Ecole des Ponts et Chaussees.
ROUCHÉ	Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers.
TISSERAND	Conseiller-maître a la Cour des Comptes.

Comité de rédaction

SIÈGE : 7, RUE DU BELLAY

Bureau :

PRÉSIDENT :

JOLIBOIS — Conseiller municipal de Paris, Secrétaire du Conseil général de la Seine, ancien Président de l'Association des personnels de travaux publics, Rédacteur en chef de « *La Tribune des Travaux Publics* » et de « *Les Travaux Publics* ».

SECRÉTAIRE GÉNÉRAL :

BONNAL — Ingénieur civil, Secretaire général de la Compagnie des Tramways à vapeur du département de l'Aude, Membre de la Société des Ingénieurs coloniaux, Professeur à l'Association philotechnique.

VICE-PRÉSIDENTS :

DACREMONT — Ingénieur des Ponts et Chaussées (Navigation de la Seine).

FALCOU — Chef du Secrétariat des services d'architecture, des promenades et plantations.

LANAVE — Ingénieur à la Société du Chemin de fer souterrain N. S., ancien Président de l'Association des personnels de travaux publics.

VIDAL — Inspecteur particulier de l'exploitation commerciale des Chemins de fer de P.-L.-M.

SECRÉTAIRES :

BONDU — Commissaire de surveillance administrative des Chemins de fer (P.-L.-M.).

DEJUST — Ingénieur de la Ville de Paris, Répétiteur à l'École centrale des Arts et Manufactures.

DIÉBOLD — Sous-Inspecteur de l'Assainissement de Paris.

LEMARCHAND — Surveillant technique des travaux de Paris (contrôle et revision).

Membres du Comité :

AUCAMUS	Ingénieur des Arts et Manufactures, chef d'atelier aux chemins de fer du Nord.
CANAL	Contrôleur des comptes des Chemins de fer (Orléans).
CHABAGNY	Ingénieur municipal (contrôle et revision).
COLAS	Ingénieur aux Chemins de fer de l'Etat, Président de l'Association des personnels de travaux publics.
DARIÈS	Ingénieur de la Ville de Paris, Licencié ès Sciences, Professeur à l'Association philotechnique et à l'Ecole spéciale des Travaux publics.
DECRESSAIN	Sous-ingénieur des Mines (Service des appareils à vapeur). Professeur à l'Ecole d'Horlogerie.
DUFOUR	Commis principal des Ponts et Chaussées (Contrôle P.-L.-M.). Lauréat de l'Académie française.
GRIMAUD	Ingénieur chef du service des Travaux publics de la Martinique.
HALLOUIN	Inspecteur principal de l'Exploitation commerciale des Chemins de fer de l'Etat.
LÉVY-SALVADOR	Ingénieur du Service technique de l'Hydraulique agricole au Ministère de l'Agriculture.
MALETTE (G.)	Sous-ingénieur des Ponts et Chaussées, Agent voyer cantonal (Service ordinaire et vicinal de la Seine).
MUNSCH	Rédacteur principal à la Préfecture de la Seine.
PRADÈS	Sous-chef de bureau au Ministère de l'Agriculture, Membre du Conseil d'administration de l'Association philotechnique.
PRÉVOT	Conducteur faisant fonctions d'Ingénieur des Ponts et Chaussees (Service du nivellement général de la France).
REBOUL	Sous-ingénieur des Mines (Service des appareils à vapeur).
ROUSSEAU (Ph.)	Secrétaire général de la Société française des Ingénieurs coloniaux.
ROUX	Sous-ingénieur faisant fonctions d'Ingénieur des Ponts et Chaussees (Service ordinaire et vicinal).
SAINT-PAUL	Conducteur principal du service municipal des Eaux.
SIMONET	Ingénieur à la Societé du Chemin de fer souterrain N. S.

AVANT-PROPOS

Le conducteur de travaux et l'architecte qui vivent *sur le tas*, selon l'originale expression des chantiers, se trouvent souvent aux prises avec les difficultés, dont l'une des plus réelles réside dans l'appréciation de la valeur absolue des matériaux de construction. Or, il est indéniable que la durée des ouvrages d'art et des habitations dépend, avant tout, du choix judicieux des éléments qui servent à leur édification.

A la vérité, dans un grand nombre de cas, une longue pratique des travaux supplée à l'insuffisance de données théoriques. C'est la raison pour laquelle le praticien est presque toujours le meilleur juge dans la réception des matériaux naturels. Mais il n'en est plus de même si l'on considère les matériaux artificiels, où l'apparence extérieure ne joue qu'un rôle secondaire.

D'autre part, le développement des produits artificiels a pris depuis quelques années une telle importance que le praticien doit être nécessairement doublé du technicien. Les nouveaux produits qui entrent hardiment en lutte avec des matériaux séculaires donnent à la question économique une importance capitale accrue encore par l'établissement de nombreuses fabriques de chaux et de ciments et par les modifications apportées aux procédés de fabrication dans le domaine de l'industrie sidérurgique. Cette production nouvelle, sinon cette

surproduction, vient dérouter quelque peu la quiétude de l'homme de l'art. Aussi la multiplicité de produits généralement présentés comme supérieurs aux matières similaires oblige-t-elle le conducteur de travaux publics et l'architecte à s'entourer de garanties de sincérité et de sécurité; c'est la raison pour laquelle ces techniciens s'adressent à des laboratoires spécialement organisés qui les renseignent non seulement sur les conditions chimiques qui, pour les chaux, les ciments, les asphaltes, les bronzes, les aciers, etc., jouent un rôle de grande importance, mais encore sur les conditions de résistance, d'écrasement, etc., non moins utiles à connaître.

Mais les résultats consignés dans les procès-verbaux d'analyses et d'essais seraient de peu d'utilité s'ils ne pouvaient être interprétés d'une façon pratique. A quoi servirait de connaître la teneur pour cent en phosphore d'un acier, si l'on ignorait à la fois l'influence nuisible de cet élément dans le métal ferreux, la limite qui ne doit pas être dépassée dans son emploi et le mode de dosage de ce métalloïde? De quel secours serait un essai de rupture par traction d'une briquette de chaux ou de ciment si nulle fixation n'indiquait le chiffre minimum qui doit être exigé?

C'est en s'inspirant de ces réflexions qu'a été conçu cet ouvrage livré à l'appréciation des lecteurs de la *Bibliothèque du Conducteur de Travaux publics*. Il est notoire qu'un pareil sujet méritait d'être traité avec plus d'ampleur. Mais, en se bornant à donner un aperçu général des procédés journellement employés et par cela même utiles à connaître, ce livre peut avoir quelque intérêt s'il permet d'éviter à quelques personnes de longues et pénibles recherches.

Dans la première partie de cet ouvrage sont indiquées

les grandes lois et principes de la chimie et de la physique. Les théorèmes de mécanique sont réunis à la physique générale dont ils forment l'une des parties essentielles. Ces lois, principes et théorèmes trouvent si souvent leur application dans les opérations usuelles des laboratoires qu'il était indispensable de rappeler ces phénomènes fondamentaux.

Les principaux chapitres de la partie relative aux notions de chimie générale et analytique traitent des lois et principes, opérations analytiques, méthodes d'analyse, réactifs, classification des métaux, réactions des corps.

Les chapitres concernant la physique sont relatifs aux propriétés de la matière, à la pesanteur, aux propriétés mécaniques des corps, à l'hydrostatique, à la chaleur, à l'optique et à l'électricité.

Dans la seconde partie, les matériaux sont envisagés au triple point de vue de leurs propriétés (chimiques, physiques et mécaniques), des analyses et essais auxquels ils donnent lieu et de l'interprétation des résultats fournis par ces analyses et par ces essais. Ils sont passés en revue dans l'ordre suivant : matériaux naturels et matériaux artificiels.

Les matériaux naturels forment la substance de six chapitres. Ils comprennent les pierres naturelles et les calcaires, — les ardoises, — les amendements, les terres et les sables, — les bitumes, les asphaltes et les goudrons, — les bois, — les charbons.

Les matériaux artificiels, étudiés en onze chapitres, sont : les chaux, les ciments, les trass et les pouzzolanes, — les plâtres, — les mortiers et les bétons, — les argiles, les briques et les tuiles, — les fers, les aciers et les fontes, — les aciers spéciaux, — le cuivre et ses alliages, — le zinc et le blanc de zinc, — le

plomb, la céruse et le minium, — l'aluminium, le nickel et leurs alliages, — les verres.

Parmi ces produits, les chaux, les ciments et les matériaux ferreux ont reçu un développement en rapport avec leur importance dans les travaux publics.

Enfin, les conducteurs des ponts et chaussées, auxquels sont souvent confiés des projets de distribution d'eau, trouveront dans le chapitre : — eaux potables, — des renseignements utiles sur les conditions auxquelles doivent satisfaire les eaux d'alimentation.

A la fin du volume est annexée une bibliographie, avec noms d'auteurs, des ouvrages et publications qui ont été mis à contribution pour la rédaction de ce travail.

L'Auteur.

CHIMIE ET PHYSIQUE
APPLIQUÉES AUX TRAVAUX PUBLICS

PREMIÈRE PARTIE

A. — RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE CHIMIE

I. — CHIMIE GÉNÉRALE

CHAPITRE Ier

LOIS ET PRINCIPES

Loi des poids ou de la conservation de la matière. — Le poids d'un composé est égal à la somme des poids des composants.

Loi des proportions définies ou de Proust. — Deux corps, pour former un même composé, se combinent toujours dans les mêmes proportions. Exemple : 1 gramme d'hydrogène se combine avec $35^{gr},5$ de chlore pour former $36^{gr},5$ d'acide chlorhydrique.

Loi des proportions multiples ou de Dalton. — Quand deux corps se combinent en plusieurs proportions, il y a toujours un rapport simple entre les différents poids de l'un des corps qui s'unissent avec un même poids de l'autre. Exemple : combinaisons de l'azote et de l'oxygène : il y a un rapport simple entre les poids d'oxygène qui s'unissent à un même poids d'azote.

Loi des volumes ou de Gay-Lussac. — Quand deux gaz se combinent, les volumes des composants sont entre eux dans un rapport simple; il y a aussi un rapport simple entre le volume du composé, à l'état gazeux, et les volumes des composants.

Si les gaz se combinent à volumes égaux, il n'y a pas contraction; dans le cas contraire, il y a contraction; elle est de 1/3 ou de 1/2 de la somme des volumes composants, selon que ceux-ci sont dans le rapport de 2 à 1 ou de 3 à 1. Exemple : 2 volumes d'hydrogène s'unissent à 1 volume d'oxygène pour former 2 volumes de vapeur d'eau; 1 volume de chlore se combine avec 1 volume d'hydrogène pour former 2 volumes de gaz acide chlorhydrique.

Loi de Dulong et Petit. — Cette loi est rappelée en physique (loi des chaleurs spécifiques).

Loi de l'isomorphisme de Mitscherlich. — Les corps isomorphes ont des constitutions chimiques semblables.

Principe du travail moléculaire. — La quantité de chaleur dégagée dans une réaction quelconque mesure la somme des travaux chimiques (combinaisons ou décompositions) et physiques (changements d'état physique ou condensation) accomplis dans cette réaction.

Principe de l'équivalence calorifique des transformations chimiques. — Si un système de corps simples ou composés, pris dans des conditions déterminées, éprouve des changements physiques ou chimiques capables de l'amener à un nouvel état (sans donner lieu à aucun effet mécanique extérieur au système), la quantité de chaleur dégagée ou absorbée par l'effet de ces changements dépend uniquement de l'état initial et de l'état final du système; elle est la même, quelles que soient la nature et la suite des états intermédiaires.

Principe du travail maximum. — Tout changement chimique accompli sans l'intervention d'une énergie étrangère (chaleur, électricité, lumière) tend vers la production du

corps ou du système de corps qui dégage le plus de chaleur.

De ce principe on tire le corollaire suivant :

Toute réaction chimique susceptible d'être accomplie sans le concours d'un travail préliminaire, et en dehors de l'intervention d'une énergie étrangère, se produit nécessairement si elle dégage de la chaleur.

Poids moléculaires. — Le poids moléculaire d'un corps est le poids relatif de la molécule de ce corps. C'est aussi le poids du corps simple ou du composé gazeux qui occupe le même volume que 2 d'hydrogène.

Les poids moléculaires des gaz sont proportionnels aux densités de ces gaz.

Poids atomiques. — Les poids atomiques sont les poids relatifs des atomes, c'est-à-dire les plus petits poids des corps simples qui entrent dans les poids moléculaires des corps composés.

Valences. — La valence de l'atome d'un métalloïde est la capacité de saturation de cet atome par l'hydrogène considéré par définition comme monovalent.

La valence de l'atome d'un métal est la capacité de saturation de cet atome par le chlore monovalent.

Classification des principaux éléments d'après leur valence :

ÉLÉMENTS MONOVALENTS...	Hydrogène, chlore, brome, iode, fluor. Argent, potassium, sodium, lithium, thallium.
ÉLÉMENTS DIVALENTS.....	Oxygène, soufre, sélénium, tellure. Baryum, strontium, calcium, magnésium, cuivre, mercure, plomb, cadmium, manganèse, fer, chrome, cobalt, nickel, zinc.
ÉLÉMENTS TRIVALENTS....	Azote, phosphore, arsenic, bore. Or, bismuth.
ÉLÉMENTS TÉTRAVALENTS..	Carbone, silicium. Etain, titane, platine, palladium, aluminium, fer, chrome.
ÉLÉMENTS PENTAVALENTS..	Azote, phosphore, arsenic. Antimoine.

Classification des métalloïdes en familles naturelles (Dumas). — *Première famille :* Fluor, chlore, brome, iode ;
Deuxième famille : Oxygène, soufre, sélénium, tellure ;
Troisième famille : Azote, phosphore, arsenic ;
Quatrième famille : Carbone, bore, silicium.

Classification des métaux (Thénard) :

I. — POTASSIUM, SODIUM, LITHIUM, CÆSIUM, RUBIDIUM, THALLIUM. — BARYUM, STRONTIUM, CALCIUM.	Ces métaux décomposent l'eau à froid. Ils s'oxydent dans l'air sec aux températures élevées ; leurs oxydes sont irréductibles par la chaleur. Les six premiers, monovalents, sont les métaux *alcalins*. Les trois autres sont les métaux *alcalino-terreux ;* ils sont divalents.
II. — MAGNÉSIUM ET MANGANÈSE.	Métaux décomposant l'eau au-dessus de 50°. Ils s'oxydent dans l'air sec aux températures élevées ; leurs oxydes sont irréductibles par la chaleur. Le magnésium et le manganèse sont divalents.
III. — FER, ZINC, NICKEL, COBALT, CHROME, CADMIUM, INDIUM, VANADIUM, URANIUM.	Métaux décomposant l'eau au rouge sombre, ou à froid en présence des acides. Ils s'oxydent dans l'air sec aux températures élevées ; leurs oxydes sont irréductibles par la chaleur.
IV. — TUNGSTÈNE, OSMIUM, MOLYBDÈNE, TANTALE, TITANE, ÉTAIN, ANTIMOINE, NIOBIUM.	Métaux décomposant l'eau au rouge vif, ou à 100° en présence des bases énergiques ; ils forment des acides. Ils s'oxydent dans l'air sec aux températures élevées ; leurs oxydes sont irréductibles par la chaleur.
V. — CUIVRE, PLOMB, BISMUTH.	Métaux ne décomposant l'eau qu'au rouge blanc. Ils s'oxydent dans l'air sec aux températures élevées ; leurs oxydes sont irréductibles par la chaleur.
VI. — MERCURE, RHODIUM, PALLADIUM, RUTHÉNIUM. — ARGENT, OR, PLATINE, IRIDIUM.	Métaux ne décomposant l'eau à aucune température pour s'emparer de l'oxygène. Les quatre premiers s'oxydent dans l'air sec aux températures peu élevées ; les quatre derniers ne s'oxydent à aucune température. Les oxydes de tous ces métaux sont décomposables par la chaleur.

Lois de Berthollet. — Ces lois sont relatives aux actions des acides sur les sels, des bases sur les sels, des sels sur les sels.

Pendant longtemps, elles ont servi de guide pour prévoir les réactions des corps entre eux. On a reconnu ensuite que ces lois se trouvaient en défaut dans nombre de cas et qu'elles ne se vérifiaient que quand les réactions dégagent de la chaleur. Cependant, en raison de l'importance qu'on leur a attribuée, il est bon de les rappeler ici.

Action des acides sur les sels. — 1° La décomposition d'un sel par un acide est complète quand le nouvel acide est plus fixe que celui du sel;

2° La décomposition d'un sel par un acide soluble est complète quand l'acide du sel est insoluble.

3° La décomposition est encore complète quand l'acide qui agit peut former avec la base du sel un composé insoluble.

Action des bases sur les sels. — 1° Un sel dont la base est volatile est décomposé complètement par une base fixe ;

2° Un sel dont la base est insoluble est décomposé complètement par une base soluble ;

3° Une base décompose complètement un sel quand elle peut former avec l'acide du sel un composé insoluble ;

Action des sels sur les sels. — 1° Deux sels se décomposent complètement quand, de l'échange de leurs acides et de leurs bases, peut résulter un sel plus volatil que ceux qui sont en présence ;

2° Deux sels en dissolution se décomposent complètement quand, de l'échange des bases et des acides, peut résulter un composé insoluble dans les circonstances où l'on opère.

II. — CHIMIE ANALYTIQUE

La chimie étudie les corps qui constituent l'écorce terrestre principalement au point de vue de leur composition, de leur décomposition et des actions réciproques que ces corps exercent les uns sur les autres.

La partie spéciale de cette science connue sous le nom d'analyse s'occupe de décomposer les corps en éléments simples. L'analyse est qualitative quand elle ne recherche que la nature des composants ; elle est quantitative quand elle détermine les proportions relatives de ces composants.

CHAPITRE II

OPÉRATIONS ANALYTIQUES

Il serait inexact de penser qu'un matériel encombrant et onéreux soit absolument indispensable pour mener à bien une analyse. Dans beaucoup de cas, au contraire, un petit matériel et quelques réactifs suffisent pour effectuer sinon une analyse rigoureuse, ce qui exige plutôt une grande habitude des manipulations, du moins une analyse approchée, souvent suffisante dans la pratique.

Prise d'échantillons. — La prise d'échantillons présente un intérêt capital. En effet, en admettant même que toutes les opérations subséquentes soient exactes, l'analyse n'aura de réelle valeur qu'à la condition expresse que l'échantillon choisi représente bien la moyenne des matériaux considérés.

S'agit-il d'une carrière destinée à la fabrication d'une chaux ou d'un ciment? On devra prendre toute précaution possible pour que chaque banc calcaire soit représenté proportionnellement à son importance, surtout si les bancs sont hétérogènes.

Si, d'autre part, on a affaire à des minerais apportés par bateau ou par voie ferrée et devant servir à une exploitation métallurgique, c'est par un mélange et un brassage minutieux de certaines brouettées judicieusement choisies que l'on aura une idée exacte du rendement de ces matériaux.

Dans d'autres cas, le prélèvement s'effectue d'une façon différente. Une analyse demandée en vue de la captation de sources pour l'alimentation d'une ville exige une eau puisée à une profondeur convenable. Si l'on se propose simplement

de connaître le degré hydrotimétrique d'une eau provenant d'un puits ou d'une canalisation, le liquide sorti en premier lieu de la pompe ou du robinet doit être rejeté, car il a pu se charger de sels métalliques au contact prolongé des tuyaux de plomb.

Pour des matières pulvérisées contenues dans des sacs ou dans des barils (chaux, ciment, minium, céruse, blanc de zinc, etc.), il vaut mieux ne pas vider le récipient pour opérer un prélèvement. On emploie, de préférence, une sonde en métal de $0^m,60$ environ de longueur, dont une fente longitudinale facilite l'introduction d'une certaine quantité de matière, lorsqu'on l'enfonce progressivement. La partie supérieure, terminée par une poignée, permet de faire faire un quart de tour ou un tour entier avant de sortir l'appareil (*fig.* 1).

FIG. 1. Sonde en métal.

Dans d'autres circonstances, on se sert de dispositifs spéciaux, tels que la pelle échantillonneuse de Brunton, en usage en Amérique pour le prélèvement des minerais.

Ce simple exposé montre l'importance capitale qu'il convient d'attribuer à la prise des échantillons, eu égard aux pronostics qu'on se propose de tirer de leur analyse ultérieure.

Selon les cas, les échantillons sont ensuite employés tels quels (eaux), ou réduits en morceaux grossièrement concassés (fontes blanches); d'autres fois, ils sont pulvérisés (calcaires) ou porphyrisés, c'est-à-dire amenés à un état de division encore plus petit (fer chromé). D'ailleurs, plus un corps se trouve réduit à un état de division avancé, plus le contact ultérieur avec les réactifs est rendu facile et rapide.

Les échantillons qui ne doivent pas servir immédiatement à l'analyse ou dont on veut assurer la conservation sont renfermés dans des bocaux ou des flacons bouchés hermétiquement.

Pesée. — Elle se fait au moyen d'une balance de précision sensible au milligramme.

Les conditions de justesse et de sensibilité sont les deux qualités essentielles d'une bonne balance.

Toute personne désireuse de s'occuper d'analyse arrive assez vite à connaître la manière dont s'effectuent les pesées. La double pesée ou *pesée de Borda* est la seule employée.

La position d'équilibre doit toujours être vérifiée au préalable. Les poids ne sont maniés qu'avec une pince dite *brucelle*. Il faut se mettre à l'abri des courants d'air qui produisent des variations dans l'équilibre des plateaux de la balance et occasionnent des pertes de substance.

La matière à peser se place dans une ampoule, une capsule de platine (*fig.* 2), un verre de montre (*fig.* 3) ou un tube bouché à l'émeri (*fig.* 4 et 5) ; en aucun cas elle ne doit être posée directement sur le plateau.

Fig. 2. Capsule de platine.

La tare est établie au moyen d'un flacon contenant de la grenaille de plomb ; elle fait équilibre à la capsule de platine ou autre récipient devant contenir la matière et à un poids additionnel (2 grammes, par exemple) représentant le poids de la prise d'échantillon.

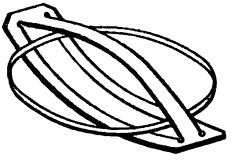

Fig. 3. — Verre de montre.

Si la matière est hygroscopique, on met dans la cage de la balance un vase dans lequel se trouve un corps desséchant (acide sulfurique, chlorure de calcium).

Un cavalier, du poids d'un milligramme, se déplaçant sur

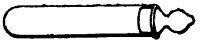

Fig. 4. — Tube bouché à l'émeri.

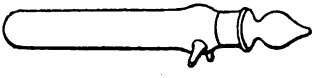

Fig. 5. — Tube bouché à l'émeri.

le fléau gradué de la balance, est souvent très avantageux pour la rapidité de la pesée.

La substance est placée dans la capsule au moyen d'une

pince (*fig.* 6), d'une pelle en clinquant ou d'une main en corne (*fig.* 7). Autant que possible, on doit éviter l'usage direct de la main.

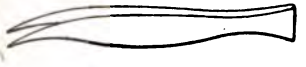

Fig. 6. — Pince.

Fig. 7. — Main en corne.

Il est évident qu'une erreur de pesée, même très faible, entraîne une erreur proportionnelle dans l'analyse.

Attaque. — Elle s'effectue dans des conditions les plus variables selon le corps à analyser.

Très souvent, on se sert de ballons en verre ou de capsules en porcelaine. D'autres fois, on a recours à des capsules en platine ou en argent.

La nature et la forme du récipient doivent être en rapport avec le genre d'analyse à exécuter.

Les réactifs doivent être chimiquement purs et le volume utilisé strictement suffisant pour le résultat cherché. Il est bon de se méfier des projections toujours à redouter lorsque le réactif est versé en une seule fois.

L'attaque se fait par voie humide ou par voie sèche, c'est-à-dire par dissolution ou par fusion.

Dissolution. — Elle est simple ou chimique ; dans ce dernier cas, il se forme une ou plusieurs combinaisons.

Fig. 8. Bécherglas.

Les dissolvants d'un usage courant sont : l'eau distillée, les acides azotique, sulfurique, chlorhydrique, fluorhydrique, l'eau régale, les alcalis, l'alcool, l'éther, le sulfure de carbone, etc. Suivant les cas, ils sont concentrés ou étendus. Ainsi, pour obtenir la dissolution du fer dans l'acide azotique, on fait usage d'acide ayant une densité de 1,20 ; l'acide plus concentré à 36° Baumé (densité : 1,33) rend le métal *passif*.

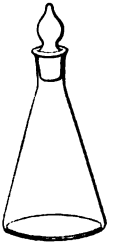

Fig. 9. Fiole conique.

En général, une dissolution est accélérée par une élévation de température.

Les vases doivent être appropriés au genre de dissolution que l'on veut effectuer. Ce sont des ballons, des bécher-glas (*fig.* 8), des fioles coniques (*fig.* 9), des capsules, etc.

Fusion. — Certaines substances sont insolubles dans les acides. On en opère alors la fusion à l'aide d'un brûleur, d'un soufflet d'émailleur ou encore d'un chalumeau à gaz de Schlœsing. Pour certaines substances réfractaires nécessitant une forte température, on se sert du four Forquignon et Leclerc (*fig.* 10) ou d'un four électrique.

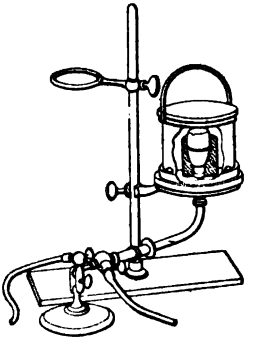

Fig. 10. — Four Forquignon et Leclerc.

Si l'on ne dispose pas de gaz d'éclairage ou d'électricité, on place le creuset de platine (*fig.* 11) dans un creuset de terre de plus grande dimension qu'on lute et qu'on introduit dans un feu de forge plus ou moins violent.

Les roches naturelles et les silicates doivent être fondus au rouge dans un creuset de platine avec du carbonate de potassium ou mieux avec un mélange de carbonates alcalins.

Quelquefois, la désagrégation de la matière nécessite comme réactif le bisulfate de potassium, de sodium ou d'ammonium (exemples : fer chromé, fer titané). Dans ce cas, c'est l'anhydride sulfurique qui agit à haute température.

Fig. 11. Creuset.

Le culot obtenu par ces procédés est refroidi, puis dissous dans l'eau pure ou acidulée.

Évaporation. — Cette opération a pour but de séparer un liquide volatil d'une substance fixe ou moins volatile.

Le liquide vaporisé est perdu.

On entend par *évaporation à sec* la disparition complète du liquide de manière à laisser comme résidu final le corps solide seul.

On doit toujours opérer à l'abri des poussières de l'air.

La concentration de la liqueur peut se faire, dès le début, à feu nu, mais le plus généralement, l'opération se termine au bain-marie ou sur une plaque chaude afin d'éviter des projections.

Les vases usités consistent en capsules de porcelaine (*fig.* 12), de platine ou d'argent.

Pour empêcher les sels de *grimper*, c'est-à-dire de recouvrir les parois internes et externes de la capsule, il est bon d'enduire les bords de celle-ci d'un peu de vaseline ou de suif.

Fig. 12. — Capsule.

Certaines évaporations exigent des précautions spéciales. Dans cet ordre d'idées, on citera les liqueurs formées en majeure partie de sulfure de carbone, d'éther ou d'alcool (analyse des bitumes); il faut alors se mettre à l'abri de toute flamme trop rapprochée.

L'évaporation peut être hâtée de diverses manières, soit en insufflant de l'air, chauffé ou non, à la surface du liquide, soit au contraire en aspirant l'air au-dessus de cette surface, au moyen d'une trompe.

Précipitation. — C'est le passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide par suite de l'addition d'un réactif. Tandis que dans la cristallisation ce passage se fait lentement, dans la précipitation, au contraire, il a lieu beaucoup plus rapidement. C'est un moyen de séparation très fréquent.

Cette séparation peut se produire de diverses façons. L'addition d'alcool à une dissolution aqueuse de sulfate de calcium fait immédiatement déposer ce corps. Une lame de fer, plongée dans une solution cuivrique, se recouvre d'un dépôt de cuivre métallique. Du phosphate de sodium, ajouté à une liqueur ammoniacale contenant un sel de magnésium, laisse déposer, au bout de douze heures, un précipité complet de phosphate ammoniaco-magnésien.

Dans les exemples précédents, on distingue facilement le *précipité*, qui est le corps solide produit, du *précipitant*, qui est le réactif qui a servi à le former.

On obtient des précipités pulvérulents, cristallins, gélatineux, caillebottés, floconneux, etc.

L'agitation favorise la production des précipités floconneux ; le frottement contre les parois du vase, celle des précipités cristallins.

En général, la chaleur facilite la précipitation. (Exemple : à 60° a lieu la précipitation du phosphomolybdate d'ammonium pour le dosage du phosphore dans les aciers.)

Décantation. — Quand le précipité a une densité assez grande, les particules tombent rapidement au fond du vase,

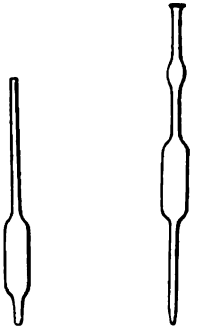

Fig. 13. — Pipette.

Fig. 14. — Pipette.

Fig. 15. — Récipient florentin.

qu'il suffit alors d'incliner avec précaution pour enlever le liquide surnageant. En dernier lieu, on se sert d'une pipette (*fig.* 13 et 14) ou d'un siphon. (Exemple : dépôt de matières sableuses se formant assez souvent, au bout de plusieurs jours, dans des récipients contenant de l'eau à analyser.)

Il est bon de faire usage de vases appropriés, à l'exclusion de ballons qui rendent la décantation plus difficile en raison de leur forme. Dans certains cas, on se sert de vases à précipiter. Quelquefois ces vases affectent une forme spéciale (récipient florentin) (*fig.* 15).

Filtration. — La filtration, comme on le sait, a pour objet de séparer les corps solides des corps liquides.

En général, on emploie le papier à filtrer, qui est un papier spécial non collé avec lequel on confectionne des disques. Pour préparer soi-même un filtre sans plis, le seul utilisé en analyse à cause de la facilité avec laquelle on le lave, on commence par plier en quatre un morceau de papier de dimension convenable ; puis, le pressant sur un patron en zinc ayant la forme d'un quart de cercle, on découpe le papier en suivant l'arc de ce patron. Pour la filtration, on applique le disque obtenu sur un entonnoir en verre (*fig.* 16), de dimension plus grande, en ouvrant la partie supérieure du filtre de manière à faire épouser à la surface extérieure du papier les parois internes de l'entonnoir. Un jet de pissette bien dirigé fait adhérer le papier au verre. Une certaine habileté, qu'on acquiert facilement au bout de peu de temps, est indispensable, car la moindre boursouflure produite peut devenir la cause d'un déchirement ultérieur, ce qui oblige à recommencer l'opération.

Fig. 16. — Entonnoir en verre.

On trouve dans le commerce des disques tout préparés : les marques Berzélius, Schleicher et Schüll, Munktell, sont particulièrement recommandables.

Pour connaître le poids des cendres que fournit un filtre par sa calcination, on incinère dix filtres semblables et on pèse le résidu. On divise le poids trouvé par 10. Ce poids établi, une fois pour toutes, pour le même papier, doit être déduit du poids trouvé d'un résidu filtré soumis à la calcination.

Les précipités gélatineux demandent beaucoup de temps pour leur filtration.

On accélère souvent l'opération par l'emploi de dispositifs spéciaux (trompes).

Lorsque la liqueur est trop acide ou quand le papier la décompose, on est amené à remplacer celui-ci par d'autres substances (tampons de laine, de coton, de soie, de verre, d'amiante). Pour confectionner un filtre en amiante, on

chauffe au rouge un peu de ce corps ; on le débarrasse ainsi de toute trace de matière organique. On place ensuite la substance au fond d'un entonnoir en verre (*fig.* 17), on presse légèrement avec le doigt de manière à former un tampon, puis on fait couler un peu d'eau. On arrive facilement de cette façon à régler l'écoulement du liquide. On retire alors le doigt ; le filtre est prêt à fonctionner.

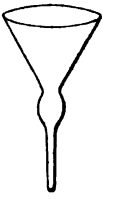

Fig. 17. Entonnoir à boule.

Lors de la filtration, le vase contenant le liquide est incliné doucement au-dessus de l'entonnoir ; le liquide est versé peu à peu en suivant l'agitateur appliqué, d'une part, contre le bec ou le bord supérieur du vase, et, d'autre part, contre le bord supérieur du filtre.

Lavage (ou édulcoration). — Quand l'opération précédente est terminée, la séparation des corps n'est pas encore complète. Le précipité et le filtre ont retenu une partie du liquide ; pour les en débarrasser, on procède au lavage. Pour cela, la pissette ou fiole à laver (*fig.* 18), contenant le liquide nécessaire (eau, eau ammoniacale, alcool, etc.), devient indispensable. Le jet est dirigé sur le bord supérieur du filtre, dont on lui fait faire plusieurs fois le tour en descendant progressivement de manière à rassembler en même temps le précipité à la pointe du filtre. Plusieurs lavages sont nécessaires.

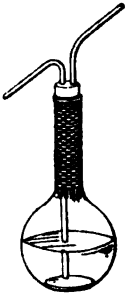

Fig. 18. — Pissette.

Le vase et l'agitateur doivent eux-mêmes être lavés.

On reconnaît qu'un lavage est complet quand la liqueur recueillie à la base de l'entonnoir ne produit aucune réaction sur le papier rouge et bleu de tournesol ou encore lorsqu'une goutte, évaporée sur une lame de platine, n'y laisse aucun résidu. Les eaux de lavage sont naturellement réunies à la liqueur filtrée.

Dessiccation. — Le précipité recueilli sur un filtre est né-

cessairement humide. Il faut le dessécher de manière à lu enlever l'excès d'eau et de matières volatiles, si toutefois il n'est pas altérable à la chaleur. Une étuve à air chaud remplit ce but (*fig.* 19). Beaucoup de précipités sont secs au bout de quelques heures d'exposition à une température de 100 à 110° C.

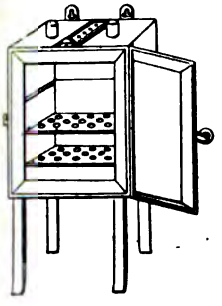

Fig. 19. — Étuve.

D'autres précipités demandent une température beaucoup plus élevée ; on a recours alors à des étuves à huile, à glycérine, à gaz, etc. Quelquefois on est obligé de dessécher certains corps dans une atmosphère raréfiée en présence de matières avides d'eau.

Les appareils d'un usage courant pour la dessiccation directe sont les vases plats, les capsules, les verres de montre, les cristallisoirs (*fig.* 20), etc.

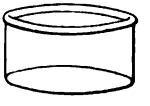

Fig. 20. Cristallisoir.

Calcination. — Cette opération s'exécute dans des creusets ou capsules en porcelaine, en platine ou en argent, sur une lampe à alcool, un brûleur, un fourneau à gaz ou un soufflet d'émailleur. Quelquefois on a recours à des creusets en graphite ou même à des tubes de verre fermés par un bout ; cela dépend du résultat final que l'on a en vue ou bien de la matière soumise à l'expérience.

On mentionnera encore, sans en donner la description, le four à moufle chauffé au charbon de bois ou au gaz, d'un usage journalier dans les laboratoires ; ce four rend de grands services quand il y a lieu d'exécuter de nombreuses calcinations simultanées (*fig.* 21).

Il va sans dire que d'autres moyens de chauffage peuvent être usités, tels que le chauffage à la houille, au pétrole, à l'essence de térébenthine, au gaz de carburateur, à l'acétylène ou à l'électricité.

Quant à l'opération proprement dite, elle diffère suivant

que le charbon produit par la combustion du filtre agit ou non comme réducteur sur le précipité. Dans le premier cas, il est indispensable d'opérer séparément la calcination du filtre et de réunir les cendres produites au résidu provenant du précipité calciné. S'il n'y a aucune réduction à craindre, on brûle ensemble le filtre et son contenu.

Dans quelques cas, on est obligé de faire la calcination

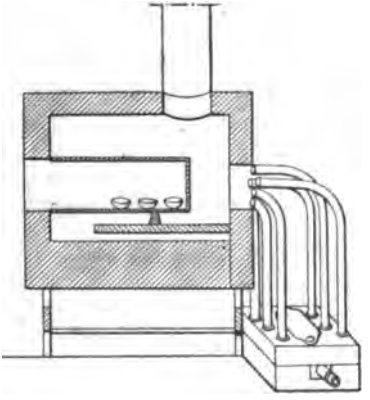

Fig. 21. — Four à moufle.

dans un courant gazeux spécial (oxygène, hydrogène, chlore, hydrogène sulfuré). Il faut alors se servir d'instruments particuliers (creuset de Rose, nacelle de platine placée dans un tube de verre situé au-dessus d'une grille à combustion, etc.).

En général, le produit calciné final répond à une formule chimique connue. Lorsqu'il est refroidi, on le pèse en prenant les précautions déjà décrites.

Cristallisation. — La cristallisation se produit quand un corps passe de l'état liquide à l'état solide en prenant une forme régulière et déterminée; cette forme s'appelle cristal. Le cristal est d'autant plus parfait et mieux constitué que le phénomène s'est lentement préparé. La cristallisation demande le concours de la chaleur, du refroidissement ou de l'évaporation.

Distillation. — On sépare une substance volatile d'un corps solide ou liquide moins volatil au moyen de la distillation.

Un appareil distillatoire comprend trois parties : le vase (ballon, chaudière, cucurbite), le réfrigérant (serpentin) et le récipient recevant le liquide condensé. Dans les laboratoires, on se sert fréquemment de l'appareil représenté par

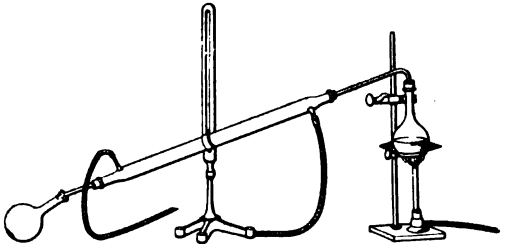

Fig. 22. — Appareil distillatoire.

la figure 22 (ex. : dosage de l'ammoniaque dans les eaux potables).

Sublimation. — Le sublimé est le produit de la condensation de la vapeur provenant d'un corps solide soumis à l'action de la chaleur. Cette espèce de distillation permet d'effectuer la séparation de substances inégalement volatiles. L'arsenic s'élimine ainsi facilement.

Électrolyse. — L'électrolyse consiste dans le dépôt d'un métal sur un support métallique.

On se sert, comme générateurs électriques, de piles, de dynamos ou d'accumulateurs. L'emploi de piles est généralement adopté en raison de la constance du courant. On se sert aussi quelquefois de piles thermo-électriques. Il est bon de disposer dans le circuit un ampèremètre et un rhéostat.

Pour l'analyse électrolytique, l'intensité du courant doit être de 0,1 à 0,2 ampère.

L'appareil employé peut affecter diverses formes. Le dispositif imaginé par M. Riche (*fig.* 23) donne de bons résultats.

On peut ainsi séparer par voie électrolytique les métaux suivants : cuivre, fer, mercure, nickel, plomb, zinc, platine, cadmium, etc. On se sert comme électrolytes de solutions d'oxalates doubles obtenues en traitant les solutions des sulfates par l'oxalate de potassium ou d'ammonium. On emploie aussi quelquefois les chlorures.

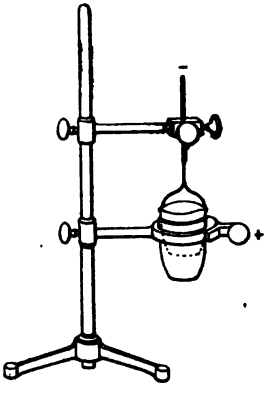

Fig. 23.
Appareil Riche pour l'électrolyse.

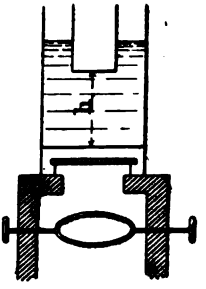

Fig. 24.
Colorimètre Müller.

Colorimétrie. — Dans un certain nombre de cas, la teneur d'une solution se détermine d'après l'intensité de sa coloration. C'est ainsi que l'on dose aisément et rapidement le cuivre et le carbone respectivement dans des dissolutions de cuivre et d'acier. On établit la comparaison avec une solution de teneur connue servant de type. On utilise à cet effet des appareils portant le nom de colorimètres.

Avec le colorimètre Müller, on emploie un verre de la couleur complémentaire de celle que l'on expérimente. Ce verre (*fig.* 24) est placé au-dessous d'un godet transparent. On enfonce le tube jusqu'à ce que l'on obtienne la lumière blanche. On mesure la hauteur h et on répète la même opération avec une liqueur titrée de même nature. Un simple calcul donne immédiatement la teneur cherchée.

Un autre colorimètre, celui de Duboscq, sera décrit à propos de l'analyse du carbone dans les aciers.

CHAPITRE III

MÉTHODES D'ANALYSE

Les procédés employés en analyse dérivent des méthodes pondérales et volumétriques. Dans les méthodes pondérales ou gravimétriques, la recherche d'un corps se termine par une pesée faite à l'aide de la balance. Dans les méthodes volumétriques, cette même recherche se termine par la lecture d'un volume. Ces dernières méthodes sont souvent plus rapides, mais aussi moins exactes.

Analyse pondérale. — L'analyse se termine par une détermination directe ou indirecte. La détermination est directe quand on sépare l'élément que l'on pèse en cet état. Ainsi, dans l'analyse des bronzes, on dose le cuivre à l'état métallique après séparation de l'étain et du plomb.

La détermination est indirecte lorsqu'on engage les constituants dans des combinaisons que l'on isole ensuite et que l'on pèse. Du poids de ces combinaisons définies, on déduit par le calcul l'élément que l'on veut doser. C'est ainsi que, dans un acier, on sépare le phosphate ammoniaco-magnésien des autres constituants et qu'ensuite on le transforme par la calcination en pyrophosphate de magnésium répondant à la formule $P^2O^7Mg^2$. Cette formule permet de calculer la teneur en phosphore contenue dans l'acier.

Analyse volumétrique. — L'analyse volumétrique repose sur une réaction connue, qui peut être : *a*) une neutralisation de solutions alcalines par les acides ou inversement : titrage alcalimétrique de la chaux libre dans un ciment ; *b*) une précipitation de composés insolubles : précipitation de l'anhydride sulfurique par une solution de chlorure de baryum dans un plâtre ; *c*) une oxydation ou une réduction : titrage du fer par une liqueur de permanganate de potassium dans une fonte ou un minerai de fer.

CHAPITRE IV

RÉACTIFS

On divise les réactifs en deux classes : les réactifs généraux et les réactifs spéciaux. Les premiers permettent de reconnaître à quel groupe appartient le corps essayé ; les seconds servent à déterminer la nature de ce corps. Il faut ajouter qu'un réactif général peut être également un réactif spécial servant à caractériser un métal.

En analyse, il faut se rappeler qu'il est bon de n'ajouter que la quantité de réactif strictement nécessaire, à moins qu'il ne soit spécifié qu'il doit y avoir un excès de réactif ; encore, dans ce dernier cas, ne faut-il pas en mettre une trop grande quantité.

On va successivement passer en revue les réactifs usuels souvent cités dans le cours de cet ouvrage.

Eau (H^2O). — L'eau doit être incolore, inodore, insipide ; on n'emploie que l'eau distillée. Elle ne doit pas changer la couleur du papier de tournesol, ni laisser de résidu après complète évaporation.

Elle ne colorera ni ne précipitera le sulfure d'ammonium (fer, plomb, cuivre), le chlorure de baryum (acide sulfurique), l'eau de baryte (acide carbonique), l'oxalate d'ammonium (chaux).

Alcool (C^2H^6O). — L'alcool doit être entièrement volatil, ne dégager aucune odeur empyreumatique lorsqu'on l'évapore sur un linge ou lorsqu'on le frotte entre les mains. Sa flamme est bleuâtre et peu visible.

On se sert d'alcool éthylique à 88°, à 91° et d'alcool absolu.

Avec l'alcool, on sépare les sels solubles des sels insolubles dans ce réactif, on insolubilise ou on augmente l'insolubilité de quelques sels, on reconnaît certains corps à la coloration qu'ils communiquent à sa flamme.

Éther ($C^4H^{10}O$). — L'éther doit se volatiliser sans résidu lorsqu'on en répand un peu sur une feuille de papier ou sur une soucoupe. Il a une densité de 0,713. Comme l'alcool, il est neutre au papier de tournesol.

Chloroforme ($CHCl^3$). — Le chloroforme doit être limpide, sans réaction acide. Il ne doit pas troubler la solution d'azotate d'argent. Il se volatilise entièrement lorsqu'on en verse une petite quantité sur une feuille de papier.

Sulfure de carbone (CS^2). — Le sulfure de carbone ne doit pas non plus laisser de résidu par sa volatilisation. Il ne doit pas colorer en noir le carbonate de plomb. Il sert de dissolvant dans l'analyse des bitumes et des asphaltes.

Acide sulfurique (SO^4H^2). — On utilise l'acide sulfurique concentré de densité 1,8 et l'acide étendu de 8 parties d'eau.

L'acide sulfurique pur est incolore. Il ne donne pas de précipité avec l'hydrogène sulfuré (plomb), ni avec l'azotate d'argent. Lorsqu'on fait tomber quelques gouttes d'acide concentré sur du sulfate ferreux sec, il ne doit pas se produire de coloration brune (acide azotique et acide hypoazotique). Dans l'appareil de Marsh, il ne doit pas y avoir d'anneau ou de tache provenant du dégagement du gaz formé par la réaction du zinc pur sur l'acide sulfurique dilué. Chauffé dans un creuset de platine, il doit y avoir volatilisation complète sans trace de résidu (sulfate de calcium ou de plomb).

Les usages principaux de ce réactif sont de dessécher les corps destinés à être pesés en leur enlevant l'eau hygrométrique, de mettre en liberté des acides moins énergiques

tels que les acides chlorhydrique, azotique, acétique, borique, de précipiter certains métaux (plomb, baryum) de leurs combinaisons à l'état de sulfates insolubles.

Acide azotique (AzO^3H). — L'acide azotique ou nitrique pur est incolore. Il se volatilise sans trace de résidu sur une lame de platine. Il ne trouble pas les azotates d'argent et de baryte. Il se colore en jaune lorsqu'il est exposé quelque temps à la lumière, même dans un vase bouché à l'émeri. Il se produit alors un peu d'acide nitreux (vapeurs rutilantes).

On emploie l'acide de densité 1,20.

Il sert comme dissolvant des métaux (aciers), oxydes, sulfures, etc. C'est un agent d'oxydation énergique. Pour l'analyse des métaux ferreux industriels, c'est l'agent d'attaque généralement employé.

Acide chlorhydrique (HCl). — Cet acide doit être incolore. Le chlore, le chlorure de fer et les matières organiques le colorent en jaune. L'acide chlorhydrique pur se vaporise sans résidu. Il ne bleuit pas l'empois d'amidon contenant de l'iodure de potassium (chlorure ou perchlorure de fer) ; il ne décompose pas le bleu indigo (chlore) et ne décolore pas l'iodure d'amidon (acide sulfureux). Dans l'acide très étendu, le chlorure de baryum ne donne pas de précipité (acide sulfurique).

L'acide chlorhydrique sert à attaquer et à dissoudre des substances insolubles, à aciduler certaines solutions, à précipiter plusieurs corps à l'état de chlorures insolubles.

Acide tartrique. — Ce sel se trouve dans le commerce dans un état de pureté satisfaisant. On empêche la formation de moisissures dans sa solution aqueuse par l'addition de quelques gouttes de chloroforme. La solution d'acide tartrique ne doit pas précipiter ni se colorer par le chlorure de baryum, l'azotate d'argent, l'hydrogène sulfuré, l'oxalate d'ammonium.

Parmi les usages de l'acide tartrique, on citera celui qui consiste à empêcher la précipitation par les alcalis des sels de fer, d'alumine, de cuivre et d'autres métaux par ce sel.

Aussi l'emploie-t-on quand on veut opérer la séparation de l'alumine et du fer dans l'analyse des calcaires, des chaux et des ciments.

Hydrogène sulfuré (H^2S). — L'hydrogène sulfuré résulte de l'action de l'acide sulfurique étendu sur le protosulfure de fer ou de celle de l'acide chlorhydrique concentré sur le sulfure d'antimoine naturel. Il sert comme réactif général pour reconnaître ou séparer un métal ou ses composés. Il existe des appareils qui permettent de le préparer facilement à l'état gazeux et à l'état de dissolution (appareil Kipp, *fig.* 25).

Potasse et soude (KOH et NaOH). — Ces deux bases doivent se dissoudre entièrement dans l'eau. Avec l'acide azotique, il ne doit pas se produire d'effervescence (CO^2) et l'évaporation à sec ne doit pas laisser de trace de résidu. La solution acidulée ne précipite pas par l'azotate d'argent, le chlorure de baryum, l'hydrogène sulfuré, le molybdate d'ammonium.

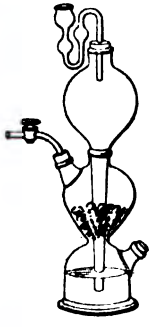

Fig. 25.
Appareil Kipp.

Les solutions ordinairement employées ont une densité de 1,3.

Avec la potasse et la soude, on précipite les oxydes métalliques insolubles. On déplace l'ammoniaque des sels ammoniacaux. Ces bases dissolvent beaucoup de sels, de composés sulfurés, etc.

Ammoniaque. — La dissolution ammoniacale employée a une densité de 0,96 correspondant à 10 0/0 d'ammoniaque. Elle se volatilise sans laisser de résidu sur une lame de platine. L'eau de chaux ne doit y déterminer aucun trouble (acide carbonique).

Si on la sature par l'acide azotique, elle ne doit pas se colorer et la liqueur acide obtenue ne doit pas précipiter par le chlorure de baryum, l'azotate d'argent et l'hydrogène sulfuré.

C'est un réactif très employé surtout pour la précipitation de beaucoup d'oxydes métalliques et d'oxydes terreux, la saturation des acides, etc.

Il est à remarquer que des oxydes précipités se redissolvent dans un excès de précipitant.

Baryte (BaO^2H^2). — Ce réactif se prépare à l'état de solution saturée. Quand on a précipité la baryte par l'acide sulfurique pur, la liqueur filtrée additionnée d'alcool reste limpide. L'évaporation de cette liqueur sur une feuille de platine ne fournit aucun résidu.

L'eau de baryte est souvent employée pour précipiter la magnésie. On s'en sert aussi pour l'élimination des acides sulfurique et phosphorique par suite de la formation de sels insolubles.

Chaux (CaO). — C'est plutôt sous forme d'eau de chaux que l'on emploie ce réactif. Pour obtenir l'eau de chaux, on agite vivement la chaux dans l'eau, on laisse reposer et on recueille par filtration le liquide clair qui ne précipite pas par l'azotate d'argent lorsqu'il a été rendu un peu acide par l'addition d'acide azotique.

L'eau de chaux sert à reconnaître la présence de l'acide carbonique et à distinguer l'acide tartrique de l'acide citrique.

Sulfure d'ammonium [$(AzH^4)HS$]. — On emploie le plus souvent le sulfure d'ammonium neutre incolore qui, par évaporation, ne laisse aucun résidu sur la lame de platine chauffée. Il ne précipite pas, même à chaud, les solutions des sels calcaires et magnésiens.

Ce réactif est très employé comme moyen de séparation des métaux du 3e groupe ou encore pour opérer la dissolution des sulfures des métaux formant le 1er groupe. Par exemple, on précipite le fer dans une solution de pierre à chaux à l'état de sulfure par l'addition d'une solution de sulfure d'ammonium.

Phosphate de sodium (PO^4Na^2H, $12H^2O$). — Ce sel est cristallisé; sa solution aqueuse ne donne pas de précipité lorsqu'on la chauffe avec de l'ammoniaque (chaux). L'azotate d'argent et le chlorure de baryum donnent avec la solution

précipitée des phosphates insolubles que l'on peut redissoudre par l'acide azotique.

La solution employée s'obtient en faisant dissoudre une partie de sel dans dix parties d'eau.

Le phosphate de sodium précipite les métaux alcalino-terreux et les oxydes métalliques. Dans l'analyse d'une chaux et d'un acier, il sert à déterminer la précipitation de la magnésie et du phosphore à l'état de phosphate ammoniaco-magnésien.

Oxalate d'ammonium $[C^2O^4(AzH^4)^2]$. — La calcination de ce sel ne doit donner aucun résidu. Ce réactif ne précipite pas par le sulfure d'ammonium ni par l'hydrogène sulfuré.

On se sert d'une solution composée de 1 partie de ce sel dans 24 parties d'eau.

Beaucoup de solutions métalliques sont précipitées à l'état d'oxalates par l'oxalate d'ammonium, mais c'est surtout pour la précipitation des sels de calcium que ce sel est utile. Aussi cette réaction est-elle utilisée lorsqu'il s'agit de déterminer la chaux chimique CaO (oxyde de calcium) dans un ciment ou dans une chaux.

L'oxalate de calcium, insoluble dans l'acide acétique, est soluble dans les acides azotique et chlorhydrique.

Acétate de sodium ($C^2H^3O^2Na$). — C'est un sel blanc, neutre, qui ne doit pas précipiter avec l'azotate d'argent et le chlorure de baryum. On emploie une solution au dixième.

Si on ajoute un acide fort à l'acétate de sodium, on a un sel de sodium et de l'acide acétique libre. L'hydrogène sulfuré précipite alors certains sulfures insolubles dans l'acide acétique, mais solubles dans les acides minéraux. Si ces sulfures n'avaient pas été ainsi traités par l'acétate de sodium, ils n'auraient pas été précipités en liqueur acide.

On se sert d'acétate de sodium pour précipiter à l'état d'acétates basiques le fer au maximum.

Carbonate de sodium (CO^3Na^2). — La solution aqueuse de carbonate de sodium, légèrement acidifiée par l'acide

azotique, ne doit pas précipiter le chlorure de baryum, l'azotate d'argent, le molybdate d'ammonium à chaud (phosphates). L'addition d'un peu d'acide chlorhydrique suivie d'une évaporation à sec ne doit pas laisser de résidu (silice).

La solution employée est de 3 parties de sel cristallisé ou de 1 partie de sel anhydre dans 5 parties d'eau.

C'est un réactif de groupe qui permet d'effectuer la séparation des métaux des 4e et 5e groupes. Il sert aussi à neutraliser les acides libres.

On emploie quelquefois le carbonate de potassium au même titre que le carbonate de sodium et souvent encore un mélange de ces deux sels dans la proportion de leurs poids atomiques. Ce mélange permet la désagrégation de substances insolubles ou difficilement solubles par les acides. Ex. : analyse des argiles, des briques et des matériaux réfractaires.

Carbonate d'ammonium $[CO^3(AzH^4)^2]$. — Ce sel, volatil sans résidu, s'emploie sous forme de solution préparée en dissolvant à froid 1 partie de sel dans 4 parties d'eau et 1 partie d'ammoniaque. Cette solution ne précipite pas par le sulfure d'ammonium ; après addition d'acide azotique, elle ne doit pas être troublée par l'azotate d'argent, le chlorure de baryum et l'hydrogène sulfuré.

On emploie le carbonate d'ammonium à la place du carbonate de sodium quand on ne veut pas introduire de matières fixes dans le cours d'une analyse, et aussi lorsqu'on veut séparer quelques carbonates solubles dans ce réactif des carbonates qui y sont insolubles.

Avec le carbonate d'ammonium, on désagrège le ciment en vue de rechercher et de doser l'anhydride sulfurique. Il y a ainsi double décomposition entre le sulfate de calcium et le carbonate d'ammonium, avec formation de sulfate d'ammonium soluble.

Molybdate d'ammonium $[MoO^4(AzH^4)^2]$. — Ce réactif s'emploie en solution azotique. Dans un litre d'eau distillée, on verse 150 grammes de molybdate d'ammonium. Après com-

plète dissolution, on ajoute un litre d'acide azotique pur. Au bout de quelques jours de repos, on filtre. Lorsqu'on porte cette solution vers 60°, il ne doit pas y avoir de précipitation (acide molybdique).

Les acides phosphorique et arsénique donnent avec l'acide molybdique et l'ammoniaque des composés jaunes insolubles dans la solution nitrique de molybdate d'ammonium. Cette réaction est utilisée dans l'analyse des aciers et des fontes pour le dosage du phosphore à l'état de phosphomolybdate d'ammonium.

Chlorure d'ammonium (AzH^4Cl). — Ce sel doit s'évaporer sur une feuille de platine sans laisser de résidu. Le sulfure d'ammonium ne doit donner aucun précipité (fer) dans la solution. Cette solution est au $\frac{1}{6}$.

Avec ce sel on précipite les sels de platine à l'état de chlorure double d'ammonium et de platine. On empêche la précipitation des sels de magnésium par l'ammoniaque, parce qu'il se produit un sel double soluble (analyse de calcaire, dosage de la chaux).

Chlorure de baryum ($BaCl^2$). — On prépare une solution aqueuse au $\frac{1}{10}$. Cette solution doit être neutre au tournesol, ne pas colorer ni précipiter par l'hydrogène sulfuré ou le sulfure d'ammonium. L'acide sulfurique précipitant dans la dissolution le baryum à l'état de sulfate, la liqueur filtrée séparée de ce précipité doit se volatiliser complètement sans laisser de trace sur une feuille de platine.

Il est surtout utilisé comme réactif général pour la séparation des métaux d'après les groupes auxquels ils appartiennent. En analyse, il est surtout employé pour précipiter l'anhydride sulfurique de ses composés (ex. : dosage de l'anhydride sulfurique dans le plâtre).

Sulfate de magnésium ($MgSO^4$). — On emploie une solution aqueuse au $\frac{1}{10}$. Cette solution doit être insensible au

papier de tournesol. Additionnée de chlorure d'ammonium, elle ne doit pas précipiter par l'ammoniaque pure (alumine), par l'oxalate, le carbonate et le sulfure d'ammonium.

Le sulfate de magnésium décèle la présence des anhydrides phosphorique et arsénique, car dans les solutions de ces sels il se produit avec le chlorure d'ammonium et l'ammoniaque un sel double insoluble de phosphate et d'arséniate ammoniaco-magnésien (dosage du phosphore dans la fonte).

Azotate d'argent ($AgAzO^3$). — La solution employée est de 1 partie de sel fondu pour 20 parties d'eau ; elle est neutre. Précipitée par l'acide chlorhydrique, puis filtrée, la nouvelle solution ne doit laisser aucun résidu sur la lame de platine.

C'est un réactif général pour les acides. Une grande quantité de sels d'argent insolubles dans l'eau se dissolvent dans l'acide azotique étendu, excepté le chlorure, le bromure, l'iodure, le cyanure, le ferro et le ferri-cyanure et le sulfure. Quelques sels d'argent insolubles ont des couleurs particulières qui les font aisément distinguer. (Ex. : le chromate d'argent a une couleur rouge ; ce caractère est utilisé pour doser le chlore dans les eaux. Une dissolution titrée d'azotate d'argent est d'ailleurs nécessaire pour ce dosage.)

Acétate de plomb [$(C^2H^3O^2)^2Pb$]. — La solution est au $\frac{1}{10}$; elle est incolore, un peu acide au papier de tournesol. On ajoute au besoin une goutte d'acide acétique. Si l'on verse dans cette solution un excès de carbonate d'ammonium et que l'on filtre, le liquide ne doit pas être coloré en bleu (cuivre).

Avec l'acétate de plomb, on reconnaît et on précipite l'hydrogène sulfuré et les sulfures, l'anhydride sulfurique et quelques acides, tels que l'acide chromique. C'est ainsi que, dans les aciers chromés, on dose avec ce réactif le chrome à l'état de chromate de plomb insoluble.

Chlorure de platine ($PtCl^4 2HCl, 6H^2O$). — C'est un chlorhydrate de chlorure qui doit se dissoudre en totalité dans l'alcool. Sa solution est concentrée au $\frac{1}{5}$.

Le chlorure de platine donne avec le chlorure de potassium et le chlorure d'ammonium un sel double peu soluble. Il n'en est pas de même avec le chlorure de sodium; aussi cette réaction est-elle utilisée pour la séparation des alcalis fixes, potasse et soude (dosage des alcalis dans l'analyse des argiles et silicates naturels).

Bisulfate de potassium. — Ce sel se dissout complètement dans l'eau. Le liquide obtenu présente une réaction acide et ne précipite pas par l'acide sulfurique, l'ammoniaque et le sulfure d'ammonium. Il facilite la fusion et la décomposition de corps difficilement attaquables par les acides (analyse du ferrochrome). La fusion s'opère dans un vase de platine.

Papier de tournesol. — Pour avoir du papier de tournesol, l'un des réactifs indicateurs les plus employés, on fait digérer 1 partie de tournesol en poudre dans 6 parties d'eau. On filtre. On partage en deux le volume du liquide.

Dans la première moitié, on verse en très faible quantité et en agitant continuellement un peu d'acide sulfurique très étendu jusqu'au moment où le liquide vire au rouge. On ajoute alors l'autre moitié du liquide à la première et on brasse le mélange. Dans ce bain, on plonge des bandes de papier non collé. Le papier s'imprègne de la liqueur colorante. On le fait sécher à l'abri des vapeurs acides ou ammoniacales. Ce papier doit s'humecter facilement. Lorsqu'il est sec, on le conserve pour l'usage dans des flacons bouchés à l'émeri. Il est très sensible à l'action de la lumière ; on l'emploie pour constater l'acidité d'une solution.

Pour obtenir le papier rouge de tournesol, on emploie la teinture bleue ci-dessus préparée, on y ajoute avec précaution un peu d'acide sulfurique très étendu, mais de manière cependant que la couleur apparaisse nettement rouge. C'est dans ce bain que l'on trempe également des feuilles de papier. Ce papier rouge se conserve comme le papier bleu. Son usage est identique au précédent. Il sert à reconnaître l'alcalinité même très faible d'un liquide.

Indigo. — La solution d'indigo dans de l'acide sulfurique étendu de 20 fois son volume d'eau sert à reconnaître les acides azotique, chlorique et le chlore.

Phénolphtaléine. — Ce réactif est incolore en présence des acides, mais il se colore en rouge vif avec les bases. La solution est composée de 1 partie de matière dissoute dans 100 parties d'alcool faible.

Diméthylorange. — Le diméthylorange (orange Poirrier n° 3) est jaune clair en présence des bases. Avec les acides forts, il vire au rouge. Les acides faibles n'exercent aucune action sur cet indicateur. On dissout pour l'usage 1 partie de diméthylorange dans 100 parties d'eau.

CHAPITRE V

CLASSIFICATION DES MÉTAUX

Dans une analyse générale, on suit une marche méthodique pour effectuer la séparation des corps entre eux.

Les métaux se divisent en plusieurs groupes, suivant la manière dont ils se comportent avec les trois réactifs généraux ci-après : l'hydrogène sulfuré, le sulfure d'ammonium et le carbonate de sodium.

Dans le premier groupe, se trouvent les métaux précipitant par l'hydrogène sulfuré ; dans le deuxième, les métaux précipitant par le sulfure d'ammonium ; dans le troisième, les métaux précipitant par le carbonate de sodium ; dans le quatrième, les métaux ne précipitant par aucun de ces trois réactifs.

Le premier groupe peut se subdiviser lui-même en deux autres groupes suivant que les sulfures produits par l'action de l'hydrogène sulfuré sur les solutions sont solubles ou non dans le sulfure d'ammonium. De sorte que finalement les métaux peuvent être classés dans les cinq groupes suivants :

Premier groupe. — Métaux précipitant en solutions acides par l'hydrogène sulfuré et dont les sulfures sont solubles dans le sulfure d'ammonium : or, platine, antimoine, étain, arsenic.

Deuxième groupe. — Métaux précipitant en solutions acides par l'hydrogène sulfuré et dont les sulfures sont insolubles dans le sulfure d'ammonium : argent, cuivre, mercure, plomb, bismuth, cadmium, platine, palladium.

Troisième groupe. — Métaux dont les solutions salines aci-

difiées ne précipitent pas par l'hydrogène sulfuré, mais dont les solutions salines neutres sont précipitées par le sulfure d'ammonium :

1° Le précipité est un sulfure : fer, nickel, cobalt, zinc, manganèse ;

2° Le précipité est un oxyde : aluminium, chrome.

Quatrième groupe. — Métaux dont les solutions salines ne précipitent pas par l'hydrogène sulfuré ni par le sulfure d'ammonium, mais précipitent par le carbonate de sodium : baryum, strontium, calcium, magnésium.

Cinquième groupe. — Métaux dont les sels ne précipitent par aucun des trois réactifs généraux : potassium, sodium, lithium, ammonium.

CHAPITRE VI

RÉACTIONS DES CORPS

Dans une analyse, il ne suffit pas d'avoir effectué une séparation complète des corps. Il faut s'assurer que le corps obtenu satisfait bien à des réactions diverses dont quelques-unes lui sont spéciales. D'autre part, ces réactions déterminent elles-mêmes la marche systematique d'une analyse. Aussi est-il nécessaire, sinon de se rappeler les caractères de chaque corps d'une façon parfaite, ce qui exigerait un effort de mémoire prodigieux, du moins de pouvoir se référer à ces propriétés le cas échéant. Les principales réactions des éléments qui vont être passés en revue sont en grande partie utilisées dans les analyses de matériaux.

Potasse. — La potasse est un alcali fixe qui, à l'état de carbonate, constitue la partie essentielle des cendres végétales. De même que son hydrate et ses sels, elle ne se volatilise pas au rouge faible. La potasse et son hydrate sont des matières très déliquescentes ; le liquide qui en résulte ne se solidifie pas malgré l'absorption facile de l'anhydride carbonique de l'air.

La potasse du commerce ou potasse à la chaux doit être purifiée par sa dissolution dans l'alcool dans lequel les matières étrangères insolubles se séparent ; on obtient la potasse à l'alcool qui est le produit employé en analyse.

Les sels de potassium se dissolvent presque tous dans l'eau avec une grande facilité. Quand l'acide du sel est incolore, les sels sont également incolores. Le carbonate cristallise

difficilement ; il est déliquescent. Le sulfate étant dépourvu d'eau ne s'altère pas à l'air.

L'hydrogène sulfuré, le sulfure d'ammonium et les carbonates alcalins n'ont pas d'action sur les sels de potassium.

Le chlorure de platine donne dans une solution concentrée de chlorure de potassium un précipité jaune orangé de chloroplatinate de potassium. Cette réaction est utilisée dans la séparation des alcalis fixes, potasse et soude. On pèse le chloroplatinate après dessiccation sans calcination ou bien on calcine ce sel, ce qui donne du platine métallique facilement séparable du chlorure de potassium que l'on dissout dans l'eau.

L'acide tartrique et le tartrate acide de sodium produisent dans les solutions de sels de potassium un précipité blanc cristallin de tartrate acide de potassium (crème de tartre).

Le sulfate d'aluminium en solution concentrée fournit un précipité de sulfate double d'aluminium et de potassium (alun).

Les sels de potassium donnent à la flamme une coloration violette. Si cette coloration est masquée par la couleur jaune formée par le sodium, on élimine cette dernière coloration en examinant la flamme à travers une solution d'indigo qui absorbe les rayons jaunes.

Soude. — La soude, son hydrate et ses sels présentent le plus généralement les mêmes caractères que ceux qui viennent d'être décrits pour la potasse, mais le liquide provenant de la déliquescence de la soude abandonnée à l'air ne tarde pas à devenir solide.

La soude se rencontre en quantité considérable dans les eaux marines sous la forme de chlorure de sodium.

Les réactifs indiqués pour la potasse ne conviennent pas pour précipiter les sels de sodium.

Il n'y a que le pyroantimoniate acide de potassium qui donne, dans les solutions neutres ou basiques des sels de sodium, un précipité blanc cristallin d'assez lente formation.

Les sels de sodium communiquent à la flamme une coloration jaune très intense qui disparaît, comme il a été dit plus haut, quand on la regarde à travers une solution d'indigo ou encore à travers un verre bleu.

La soude se dose par différence entre les alcalis fixes et la potasse.

Ammoniaque. — L'ammoniaque contenue dans un liquide se reconnaît facilement à cause de l'odeur pénétrante qu'elle dégage. C'est l'alcali volatil.

Tous les sels ammoniacaux se volatilisent à une faible température. Presque tous se dissolvent facilement dans l'eau. Les dissolutions ammoniacales sont incolores.

Broyé avec de l'hydrate de chaux ou chauffé avec une lessive potassique ou sodique, un sel ammoniacal se reconnaît aux caractères suivants : par l'odeur qu'il dégage par suite de sa volatilisation, par la réaction qu'il produit sur un papier rouge de tournesol, par la formation de fumées blanches abondantes qui se manifestent lorsqu'on approche des vapeurs qu'il répand dans l'atmosphère une baguette trempée dans l'acide chlorhydrique.

Les réactifs généraux ne donnent pas de précipités avec les sels ammoniacaux.

Le chlorure de platine donne un chloroplatinate d'ammonium. Avec l'acide tartrique et le tartrate acide de sodium, on obtient un précipité cristallin de tartrate acide d'ammonium.

Le réactif de Nessler (iodure double de mercure et de potassium) fournit un précipité jaune foncé de tétramercurammonium soluble dans l'iodure de potassium et dans l'acide chlorhydrique. S'il n'y a que des traces d'ammoniaque dans la matière essayée, on a une coloration jaunâtre. On verra plus loin que cette réaction est utilisée dans l'analyse des eaux.

Enfin l'ammoniaque peut se doser au moyen de liqueurs titrées.

Baryte. — La baryte caustique est plus soluble dans l'eau chaude que dans l'eau froide. Les acides chlorhydrique et azotique la dissolvent plus aisément. L'hydrate de baryte porté au rouge fond sans perdre l'eau qu'il contient.

La plupart des sels de baryte sont insolubles dans l'eau. L'hydrogène sulfuré et le sulfure d'ammonium sont sans action sur les sels de baryum.

Les carbonates de potassium, de sodium, d'ammonium donnent un précipité blanc de carbonate de baryum.

La potasse et la soude précipitent les sels de baryum en fournissant de l'hydrate de baryum blanc gélatineux, soluble dans un excès d'eau.

Avec le chromate neutre de potassium, on a un précipité jaune de chromate de baryum, et avec l'acide sulfurique dilué et les sulfates solubles, un précipité blanc et dense de sulfate de baryum. Ce dernier caractère est très utilisé lorsqu'on dose l'acide sulfurique dans les matériaux.

L'oxalate d'ammonium et les phosphates de sodium et d'ammonium donnent des précipités blancs d'oxalate et de phosphate de baryum.

Les sels de baryum colorent la flamme en vert jaune. On a soin de les imprégner pour cet essai d'un peu d'acide chlorhydrique.

La baryte se dose à l'état de sulfate de baryum.

Chaux. — La chaux chimiquement pure (oxyde de calcium) est blanche ; elle a une saveur caustique. L'eau de chaux s'obtient en mettant en digestion de la chaux dans l'eau, qui en dissout à peu près un millième de son poids. L'ammoniaque, la potasse, les carbonates alcalins et le phosphate de sodium produisent avec les sels de calcium à peu près les mêmes réactions qu'avec les sels de baryum.

Les carbonates de potassium, de sodium et d'ammonium donnent avec les sels de calcium un précipité blanc de carbonate de calcium. Avec un excès de carbonate alcalin, on a une précipitation complète, même en présence des sels ammoniacaux.

La potasse, la soude, l'acide sulfurique dilué fournissent des précipités blancs d'hydrate et de sulfate de calcium. Dans le cas d'acide sulfurique, l'addition d'alcool favorise la précipitation.

L'oxalate d'ammonium précipite les dissolutions neutres ou ammoniacales des sels de calcium. Le précipité blanc cristallin d'oxalate de calcium obtenu est très soluble dans les acides azotique et chlorhydrique dilués, mais il est presque insoluble dans les acides acétique et oxalique. L'oxalate de

calcium précipité et calciné au rouge donne de la chaux anhydre. Le phosphate de sodium fournit un précipité blanc de phosphate de calcium.

Les sels de calcium colorent la flamme en rouge jaunâtre; cette coloration n'est pas toujours facile à obtenir.

La chaux se dose le plus souvent à l'état de chaux caustique; quelquefois, cependant, on la pèse à l'état de carbonate de calcium.

Magnésie. — La magnésie et son hydrate sont blancs. Ils se dissolvent peu dans l'eau froide ou chaude.

La magnésie se trouve en grande quantité dans l'eau de mer. La dolomie que l'on rencontre dans certains terrains est un carbonate double de calcium et de magnésium qui ne convient pas à la fabrication de la chaux.

Certains sels de magnésium sont solubles dans l'eau; d'autres sont insolubles. Mais les sels de magnésium insolubles dans l'eau se dissolvent presque tous dans l'acide chlorhydrique.

Le carbonate de sodium produit, dans les solutions magnésiennes, un précipité blanc de carbonate de magnésium. Le carbonate d'ammonium ne donne un précipité de carbonate ammoniaco-magnésien qu'au bout d'un certain temps; mais la présence de sels ammoniacaux empêche cette réaction de se faire.

La potasse et la soude caustiques fournissent un précipité blanc un peu soluble dans un excès de réactif.

L'ammoniaque donne, dans une solution de sulfate de magnésium, un précipité d'hydrate de magnésium soluble dans un sel ammoniacal, mais cette précipitation est incomplète.

Dans une solution de sulfate de magnésium exempte de sel ammoniacal, le phosphate de sodium donne naissance à un précipité blanc de phosphate de magnésium; mais si, avant d'ajouter le phosphate de sodium, on a préalablement additionné la liqueur de chlorure d'ammonium et d'ammoniaque, on obtient un précipité blanc cristallin de phosphate ammoniaco-magnésien $PO^4Mg(AzH^4)$. Cette réaction est fréquemment utilisée dans les analyses.

Les sels de magnésium ne communiquent aucune coloration à la flamme.

La magnésie se pèse à l'état de pyrophosphate de magnésium.

Alumine. — L'argile, les roches primitives et beaucoup de roches calcaires contiennent de l'alumine en proportion variable.

L'alumine est un corps volatil et incolore, ainsi que son hydrate. Sa dissolution dans les acides étendus est lente et difficile ; elle est beaucoup plus rapide dans l'acide chlorhydrique concentré et chaud. L'hydrate d'aluminium est beaucoup plus facile à dissoudre lorsqu'il est à l'état amorphe que lorsqu'il est cristallisé. L'alumine, portée au rouge avec un alcali, devient aisément attaquable par les acides.

Les sels d'aluminium sont incolores. Ils ne se volatilisent pas. Certains sels sont solubles dans l'eau; d'autres sont insolubles.

Les composés naturels d'aluminium qui ne peuvent pas être attaqués par l'acide chlorhydrique doivent être désagrégés au rouge dans un creuset de platine par un mélange de carbonates alcalins. Il se forme un carbonate d'aluminium facilement soluble dans l'eau.

La potasse et la soude produisent dans les dissolutions des sels d'aluminium un précipité abondant d'hydrate d'alumine soluble dans un excès du précipitant. Les sels ammoniacaux n'empêchent pas la réaction.

L'ammoniaque donne un précipité blanc d'hydrate insoluble dans un excès de réactif, surtout en présence des sels ammoniacaux.

On a également un précipité blanc avec le carbonate de baryum.

Le sulfure d'ammonium fournit un précipité blanc en dégageant de l'hydrogène sulfuré. Ce précipité est insoluble dans un excès de réactif, presque insoluble dans l'ammoniaque, mais très soluble dans la potasse, dans la soude et dans les acides dilués.

L'alumine calcinée est lentement redissoute par les acides forts. Cependant, un séjour prolongé à chaud dans les acides

forts, principalement dans l'acide sulfurique, finit par en venir à bout.

L'acide citrique, l'acide tartrique et le sucre empêchent les réactions ci-dessus de se produire. L'alumine n'est plus précipitée par l'ammoniaque ni par les carbonates alcalins, pas plus que par le sulfure d'ammonium.

Oxyde de zinc. — L'oxyde de zinc et son hydrate sont blancs, insolubles dans l'eau, très solubles dans les acides forts. Par le chauffage, la couleur de l'oxyde de zinc passe au jaune, mais le refroidissement la ramène au blanc.

Les sels de zinc sont incolores. Certains d'entre eux sont solubles dans l'eau; d'autres le sont seulement dans les acides.

L'hydrogène sulfuré n'a pas d'action sur une solution de sel de zinc à acide minéral quand elle renferme un excès d'acide. S'il n'y a pas excès d'acide, on constate un précipité blanc partiel de sulfure de zinc. Pour avoir une précipitation complète, il faut ajouter une quantité suffisante d'acétate de sodium ou de potassium, le sulfure de zinc étant insoluble dans l'acide acétique.

Le sulfure d'ammonium donne un précipité blanc insoluble dans un excès de réactif, mais soluble dans les acides sulfurique, azotique et chlorhydrique.

La potasse, la soude et l'ammoniaque produisent un précipité blanc d'oxyde de zinc hydraté soluble dans un excès de réactif.

Les carbonates de potassium et de sodium précipitent les sels de zinc sous forme de carbonate insoluble dans un excès du précipitant. La réaction est la même avec le carbonate d'ammonium, mais le précipité est soluble dans un excès.

Le ferrocyanure et le ferricyanure de potassium donnent des précipités respectifs blanc et jaune brun.

Le phosphate de sodium fournit un précipité blanc de phosphate de zinc soluble dans la potasse et dans la soude.

Le zinc se dose soit à l'état d'oxyde de zinc, soit à l'état métallique (électrolyse).

Oxyde de manganèse. — Le manganèse métallique a une couleur blanc grisâtre. Il est dur et cassant; il fond difficile-

ment. Il s'oxyde rapidement à l'air et dans l'eau en formant de l'hydrogène qui se dégage. On obtient alors une poudre vert noirâtre.

Le protoxyde de manganèse est vert clair, mais l'hydrate est blanc. Ils se dissolvent tous deux avec facilité dans les acides forts.

Les sels de protoxyde de manganèse sont incolores ou rosés; les uns se dissolvent dans l'eau, les autres seulement dans les acides. Les sels solubles dans l'eau, sauf le sulfate, se décomposent au rouge.

L'hydrogène sulfuré ne précipite la solution d'un sel de manganèse à acide minéral qu'en présence de l'acétate de sodium, mais encore ne faut-il pas qu'il y ait de l'acide chlorhydrique ou sulfurique à l'état libre.

Le sulfure d'ammonium fournit un précipité couleur chair, insoluble dans un excès de réactif, mais très soluble dans les acides chlorhydrique, azotique et acétique étendus.

La potasse et la soude produisent un précipité d'oxyde de manganèse hydraté insoluble dans un excès de réactif, mais il ne faut pas qu'il y ait de sels ammoniacaux en présence.

L'ammoniaque donne le même précipité un peu soluble dans un excès de précipitant; cette réaction ne se produit pas en présence du chlorure d'ammonium.

Avec les carbonates alcalins, on a un précipité blanc rosé de carbonate de manganèse insoluble dans un excès du précipitant.

Les composés du manganèse, soit solides, soit liquides, chauffés dans un tube à essai avec un peu d'acide azotique pur et du bioxyde de plomb ou du minium, communiquen au liquide une coloration violette provenant de la formation d'acide permanganique. Des traces de manganèse sont ainsi décelées par cette expérience. Cette réaction est mise à profit pour le dosage du manganèse dans les aciers. Il faut avoir bien soin de ne pas opérer en présence de chlorures, car le chlore dégagé détruit l'acide permanganique.

Un sel de manganèse dissous dans une perle de borax et chauffé à la flamme du chalumeau communique à cette flamme une couleur qui est violette à chaud et améthyste à

froid. Mélangé et chauffé avec du carbonate de sodium et du chlorate de potassium, le sel de manganèse donne un manganate alcalin de couleur verte.

Le manganèse se dose à l'état d'oxyde salin Mn^3O^4; parfois il se détermine par comparaison avec la teinte d'une liqueur titrée de manganèse (dosage colorimétrique).

Oxyde de nickel. — L'hydrate de protoxyde de nickel est vert clair. Par la calcination, il perd son eau et il passe à l'état de protoxyde vert. Le protoxyde de nickel anhydre ou hydraté se dissout très bien dans les acides sulfurique, chlorhydrique et azotique.

Le sesquioxyde de nickel est noir.

Chauffé au rouge sombre, l'azotate de protoxyde de nickel se change en une poudre vert grisâtre composée de protoxyde et d'un peu de sesquioxyde.

L'hydrogène sulfuré ne précipite pas la solution des sels de nickel à acide minéral quand cette solution a été préalablement acidulée par un peu d'acide sulfurique ou chlorhydrique. La précipitation est complète dans une solution neutre contenant suffisamment d'acétate de sodium.

Le sulfure d'ammonium donne un précipité noir de sulfure de nickel un peu soluble dans un excès de réactif, surtout s'il y a de l'ammoniaque. Ce sulfure de nickel est, pour ainsi dire, insoluble dans les acides chlorhydrique et sulfurique dilués, mais il est soluble dans les acides nitrique et chlorhydrique bouillants, surtout si on les additionne de chlorate de potassium.

La potasse et la soude fournissent un précipité vert pomme d'oxyde hydraté insoluble dans un excès de réactif et soluble dans l'ammoniaque. Les acides citrique, tartrique et le sucre empêchent la précipitation d'avoir lieu.

L'ammoniaque donne un précipité vert pomme, les carbonates de potassium et de sodium un précipité vert clair, le cyanure de potassium un précipité vert jaunâtre.

L'azotite de potassium est sans action sur les sels de nickel, tandis qu'avec les sels de cobalt additionnés d'acide acétique on a un précipité jaune. Ce caractère permet de distinguer ces deux sortes de sels souvent mélangés.

Le nickel est utilisé dans la fabrication des aciers au nickel. Il se dose à l'état d'oxyde vert.

Oxyde de fer. — Il y a deux oxydes de fer : l'oxyde ferreux et l'oxyde ferrique. On leur conserve encore quelquefois l'ancienne dénomination de fer au minimum et de fer au maximum.

L'*oxyde ferreux* se présente sous forme d'une poudre noire ; son hydrate est blanc. Lorsqu'il est humide ou fraîchement préparé, il absorbe assez vite l'oxygène de l'air ; sa coloration devient vert grisâtre, puis brun rouge.

Les sels ferreux sont blancs lorsqu'ils sont anhydres et verts quand ils sont hydratés. Leurs dissolutions sont vertes si elles sont concentrées, mais elles ne tardent pas à passer à un degré supérieur d'oxydation.

L'hydrogène sulfuré ne précipite pas les solutions de sels ferreux acidifiées par des acides forts, sauf dans le cas où l'on a ajouté à ces solutions une quantité suffisante d'acétate de sodium. Il ne précipite pas ou ne précipite qu'incomplètement les solutions neutres ou acidifiées par les acides faibles.

Le sulfure d'ammonium précipite les sels ferreux à l'état de sulfure ferreux noir, insoluble dans un excès de réactif, soluble dans les acides sulfurique et chlorhydrique dilués et peu soluble dans l'acide acétique.

La potasse, la soude et l'ammoniaque donnent un précipité blanc d'oxyde ferreux hydraté, insoluble pour les deux premiers réactifs et soluble pour le dernier dans un excès de précipitant.

Le ferrocyanure de potassium fournit un précipité blanc bleuâtre et le ferricyanure de potassium un précipité bleu (bleu de France ou de Turnbull).

Dans une solution de sels ferreux purs, le sulfocyanate de potassium ne produit aucune action. Si l'on constate une coloration rose ou rouge, c'est qu'il s'y trouve un peu de sel ferrique.

Avec une dissolution de tanin ou la teinture de noix de galle, on ne constate aucune réaction.

L'*oxyde ferrique* naturel est gris d'acier. Quand on le pulvérise, il prend une couleur rouge brun qui est la couleur

de l'oxyde préparé artificiellement. L'hydrate ferrique est rouge brun.

L'oxyde ferrique anhydre ou hydraté se dissout dans les acides forts. Mais la dissolution de l'hydrate est beaucoup plus facile que celle de l'oxyde anhydre; pour ce dernier, il faut l'action prolongée de la chaleur.

Les sels ferriques neutres et anhydres sont blancs; les mêmes sels basiques sont rouge brun ou jaunes.

L'hydrogène sulfuré, dans les dissolutions acides, donne un précipité blanc laiteux de soufre, et la solution passe à l'état de sel ferreux.

Le sulfure d'ammonium produit un précipité noir de sulfure ferreux mélangé de soufre libre.

La potasse, la soude et l'ammoniaque donnent un précipité abondant et gélatineux d'oxyde ferrique hydraté, dont la couleur est brun rouge. Ce précipité est insoluble dans un excès de réactif, mais très soluble dans l'acide chlorhydrique. La précipitation ne se fait pas quand la solution contient une quantité suffisante de sucre ou d'acides organiques, tels que les acides citrique ou tartrique.

Avec le ferrocyanure de potassium (prussiate jaune de potassium), on a un précipité bleu (bleu de Prusse), et avec le ferricyanure de potassium (prussiate rouge de potassium) on n'a qu'une coloration brune, mais pas de précipité.

L'addition de sulfocyanate de potassium donne naissance, dans les solutions acides, à une couleur rouge sang très prononcée. Dans les solutions d'oxyde ferrique qui contiennent de l'acétate de sodium, le sulfocyanate de fer ne se forme que si on ajoute assez d'acide chlorhydrique.

Le succinate d'ammonium et le benzoate de sodium précipitent les sels ferriques.

Le carbonate de baryum précipité, en suspension dans l'eau, précipite les sels ferriques.

Le tanin et la noix de galle donnent un précipité noir ou bleu foncé.

L'oxyde de fer se trouve à l'état de combinaison dans presque tous les matériaux. C'est lui qui, le plus souvent, leur communique ces teintes variant du jaune au rouge suivant son état chimique.

Il constitue la majeure partie des minerais servant à la fabrication de la fonte ou du fer.

Le fer se dose le plus souvent à l'état d'oxyde ferrique par calcination ou à l'aide d'une liqueur titrée.

En raison de l'importance qui s'attache à ce dosage spécial, il est bon d'entrer dans quelques explications.

On dose le fer volumétriquement soit par oxydation, c'est-à-dire en transformant tout le fer à l'état de sel ferrique, soit par réduction, c'est-à-dire en ramenant tout le fer à l'état de sel ferreux. Les procédés par oxydation se font au moyen du permanganate ou du bichromate de potassium. Les procédés par réduction emploient le chlorure stanneux. D'autres méthodes dérivent de ces procédés ou présentent de l'analogie avec eux. Le dosage du fer par le permanganate de potassium (procédé Margueritte), couramment employé en France, sera seul décrit.

En présence de l'acide sulfurique, les sels ferreux passent facilement à l'état de sels ferriques par l'addition de permanganate de potassium, en vertu de la réaction suivante :

$$2MnO^4K + 10FeSO^4 + 8SO^4H^2 = 2MnSO^4 + K^2SO^4 + 5[(Fe^2)(SO^4)]^3 + 8H^2O.$$

2 molécules de permanganate (ou 316 grammes) peuvent donc transformer 10 atomes (ou 560 gr.) de sulfate ferreux en sulfate ferrique. Si l'on dissout $3^{gr},16$ de permanganate de potassium dans 1 litre d'eau distillée, on pourra faire passer $5^{gr},6$ de sel ferreux en sel ferrique ; autrement dit, 1 centimètre cube de solution correspondra à $0^{gr},0056$ de fer.

On prépare donc une solution décinormale de permanganate ($3^{gr},16$ par litre). On la titre par rapport au fil de clavecin (fer pur), au sulfate ferreux ammoniacal ou à l'acide oxalique (sels purs et stables).

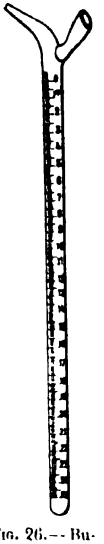

Fig. 26. — Burette graduée.

Pour doser le fer dans une solution, on réduit le sel ferrique à l'état ferreux en ajoutant de l'acide sulfurique et du zinc (hydrogène) ou de l'acide sulfureux.

Quand la réduction est complète, on verse dans la solution, goutte à goutte, la liqueur titrée de permanganate contenue dans une burette graduée (*fig.* 26). On s'arrête quand une goutte supplémentaire produit une coloration rose persistante, indice que tout le sel ferreux a été oxydé. La quantité d'acide versée donne, par un simple calcul, la teneur correspondante en fer et, par suite, en oxyde ferrique.

Oxyde de plomb. — L'oxyde de plomb est jaune ; sa couleur tire quelquefois sur le rouge. L'hydrate de plomb est blanc.

Soit anhydre, soit hydraté, l'oxyde de plomb se dissout aisément dans les acides azotique et acétique. Le sous-oxyde (Pb^2O) est noir; le minium ($2PbO.PbO^2$) est rouge; le protoxyde (PbO) est jaune (massicot) ou rouge (litharge); le bioxyde (PbO^2) est brun.

Les sels de plomb sont généralement incolores. La céruse est un carbonate de plomb ; la galène est un sulfure de plomb.

L'hydrogène sulfuré donne avec les solutions des sels de plomb un précipité noir de sulfure de plomb, insoluble dans les sulfures alcalins.

Le sulfure d'ammonium produit aussi un précipité noir de sulfure.

La potasse, la soude et l'ammoniaque fournissent, avec les sels basiques de plomb, un précipité blanc d'oxyde de plomb hydraté insoluble dans l'ammoniaque, mais soluble dans un excès du précipitant.

Le carbonate de sodium précipite du carbonate de plomb.

Avec l'acide chlorhydrique et les chlorures métalliques, on a un précipité blanc de chlorure de plomb.

L'acide sulfurique et les sulfates donnent un précipité blanc de sulfate de plomb insoluble dans l'eau et dans les acides étendus. Cette réaction est utilisée dans l'analyse des bronzes et des laitons industriels.

Le chromate de potassium et l'iodure de potassium produisent des précipités jaunes de chromate et d'iodure de plomb.

Le cyanure de potassium fournit un précipité blanc de cyanure de plomb.

Plongés dans une solution de sel de plomb, le fer et le zinc métalliques en précipitent le plomb sous forme d'une poudre grise.

On dose le plomb à l'état de sulfate, d'oxyde et de sulfure.

Oxyde de cuivre. — On distingue l'oxyde cuivreux et l'oxyde cuivrique. Le premier composé est rouge à l'état anhydre et jaune à l'état hydraté. La chaleur le transforme en oxyde cuivrique. L'oxyde cuivrique anhydre est noir; il est inaltérable à la chaleur. Hydraté, il est bleu clair. Il se dissout avec facilité dans les acides forts.

Presque tous les sels de cuivre se dissolvent dans l'eau; les sels solubles font virer au rouge la teinture de tournesol. Anhydres, ils sont généralement blancs; hydratés, ils sont bleus ou verts.

L'hydrogène sulfuré et le sulfure d'ammonium précipitent le bisulfure de cuivre en brun noir.

Avec les sels cuivriques, la potasse et la soude donnent un précipité abondant d'hydrate d'oxyde cuivrique, le carbonate de sodium un précipité de carbonate basique hydraté, l'ammoniaque un précipité bleu vert de sel basique soluble dans un excès de réactif en formant un liquide bleu d'azur (même réaction avec le carbonate d'ammonium).

Le ferrocyanure de potassium donne un précipité rouge brun caractéristique, même quand la liqueur contient très peu de cuivre. Le fer métallique se recouvre d'une couche rouge de cuivre lorsqu'on le plonge dans une solution cuivrique.

Les composés cuivriques communiquent à la flamme une belle teinte verte.

Le cuivre se dose à l'état d'oxyde, de sulfure, de métal ou par des méthodes volumétriques.

Oxyde d'étain. — Il y a deux sortes d'oxydes : l'oxyde stanneux et l'oxyde stannique.

L'oxyde stanneux est noir ou gris noir à l'état anhydre; il est blanc à l'état hydraté.

L'oxyde stannique a une couleur variant du blanc au jaune paille. La chaleur le fait passer au brun.

L'hydrogène sulfuré et le sulfure d'ammonium produisent un précipité jaune dans les solutions stanniques ; la potasse, la soude et les carbonates alcalins déterminent un précipité blanc.

Le zinc réduit la solution de chlorure stannique en précipitant l'étain de la liqueur.

L'acide azotique transforme l'étain en acide métastannique.

Oxyde de molybdène. — Le protoxyde et le sesquioxyde de molybdène sont noirs ; le bioxyde est brun foncé. Chauffés à l'air ou traités par l'acide azotique, tous ces composés se transforment en acide molybdique.

Les dissolutions des sels de molybdène sont incolores. Le ferrocyanure de potassium donne un précipité rouge brun et la décoction de noix de galle un précipité vert.

L'hydrogène sulfuré donne lieu à un précipité vert, s'il est ajouté en faible quantité, et à un précipité brun noir, s'il se trouve en grande quantité

Oxyde de tungstène. — Le bioxyde de tungstène est noir. Chauffé à haute température, il passe à l'état d'acide tungstique jaune citron, qui est insoluble dans l'eau et dans les acides.

Les acides forts précipitent en blanc les dissolutions des tungstates alcalins.

Le chlorure de baryum, l'acétate de plomb, le nitrate d'argent, le chlorure de calcium, le nitrate de mercure donnent également des précipités blancs.

Le ferrocyanure de potassium fournit un précipité rouge brun.

L'hydrogène sulfuré ne donne rien avec les solutions acides. Quant au sulfure d'ammonium, il ne produit aucune action sur les solutions de tungstates alcalins.

Oxyde de vanadium. — Les deux minerais les plus importants du vanadium sont la vanadite et la descloizite qui sont du vanadate de plomb. L'addition de vanadium aux aciers communique à ceux-ci des propriétés spéciales.

Le vanadium se trouve à l'état de vanadate dans les minerais de fer et de cuivre.

Il forme les quatre oxydes suivants : le bioxyde gris, l'oxyde noir, l'oxyde bleu foncé, l'acide vanadique, dont le degré d'oxydation est de plus en plus élevé. L'acide vanadique répond à la formule V^2O^5.

Si l'on verse un acide fort dans l'acide vanadique, on obtient un liquide jaune ou rouge que l'ébullition décolore.

Une solution d'acide vanadique chauffée avec de l'acide sulfurique et du zinc est réduite à l'état de bioxyde.

L'acide sulfureux, l'hydrogène sulfuré et les matières organiques ne réduisent les solutions d'acide vanadique qu'à l'état de tétroxyde bleu.

Le sulfure d'ammonium donne une coloration brune et le ferrocyanure de potassium un précipité vert floconneux insoluble dans les acides.

L'acide vanadique forme trois séries de sels.

Le vanadium se dose souvent à l'état d'acide vanadique provenant de la calcination du vanadate d'ammonium.

Acide chromique. — L'acide chromique est une masse cristalline rouge se présentant souvent sous forme d'aiguilles enchevêtrées. Au rouge, il se décompose en oxyde de chrome et en oxygène. Son pouvoir colorant est assez grand.

Les chromates sont presque tous insolubles dans l'eau. Ils ont une couleur rouge ou jaune.

L'hydrogène sulfuré donne, avec une solution acide de chromate, une coloration brune qui devient ensuite verte ; il se dépose du soufre.

Le sulfure d'ammonium produit, dans une solution de bichromate alcalin, un précipité vert gris un peu brun de chromate d'oxyde de chrome hydraté. Avec une solution de chromate neutre, le précipité obtenu est également de même couleur.

On réduit l'acide chromique à l'état d'oxyde au moyen de l'acide sulfureux, de l'acide chlorhydrique, du zinc métallique, des acides tartrique, oxalique, etc.

Le chlorure de baryum donne un précipité jaune clair de

chromate de baryum soluble dans les acides chlorhydrique et azotique dilués.

L'azotate d'argent forme un précipité rouge de chromate d'argent soluble dans l'acide azotique et dans l'ammoniaque.

L'acétate et l'azotate de plomb produisent un précipité jaune de chromate de plomb soluble dans la potasse et dans la soude.

L'azotate mercureux fournit un précipité rouge brique de chromate mercureux.

Un mélange d'éther et d'eau oxygénée en solution étendue donne par l'addition d'un chromate une belle coloration bleue fugace.

On dose le chrome à l'état d'oxyde chromique, de chromate de plomb ou de chromate de baryum.

Acide sulfurique. — Combiné à la chaux, l'acide sulfurique forme la pierre à plâtre ou gypse.

L'acide normal est un liquide oléagineux, incolore, inodore, de densité 1,84 quand il est à son degré de concentration le plus élevé, c'est-à-dire lorsqu'il marque 66° B. C'est un corps très avide d'eau.

L'azotate et le chlorure de baryum donnent, dans les solutions de sulfates neutres, un précipité blanc de sulfate de baryum insoluble dans les acides azotique et chlorhydrique.

L'acétate et l'azotate de plomb produisent aussi un précipité blanc de sulfate de plomb insoluble dans l'acide azotique et soluble dans la potasse et dans la soude.

L'anhydride sulfurique se dose à l'état de sulfate de baryum ou par des procédés volumétriques.

Acide phosphorique. — On distingue trois acides phosphoriques : l'acide phosphorique ordinaire ou orthophosphorique (PO^4H^3), l'acide pyrophosphorique ($P^2O^7H^4$) et l'acide métaphosphorique (PO^3H), formant des sels correspondants différant les uns des autres.

Les phosphates des métaux bi et trimétalliques, des métaux alcalins sont solubles dans l'eau ; ceux des terres alcalines et des autres métaux sont insolubles dans l'eau, mais ils sont

solubles dans l'acide azotique et dans l'acide chlorhydrique. Les phosphates acides sont tous solubles.

On reconnaît facilement la présence de l'acide phosphorique dans une solution au moyen de la liqueur molybdique qui, lorsqu'on opère en liqueur acide, donne un précipité jaune de phosphomolybdate d'ammonium de formation rapide, surtout si l'on maintient la liqueur à une température comprise entre 40 et 60°.

Le mélange magnésien produit dans une solution de phosphate de sodium un précipité blanc cristallin de phosphate ammoniaco-magnésien lent à se former. Ce précipité grenu est composé de très petits cristaux adhérant aux parois du vase dans lequel on fait l'expérience.

L'acide métaphosphorique libre ou un métaphosphate additionné d'acide acétique coagule l'albumine ou blanc d'œuf ; ce caractère permet de le différencier de l'acide pyrophosphorique libre ou du pyrophosphate, qui ne produisent aucune coagulation.

C'est surtout à l'état de pyrophosphate de magnésium ou de phosphomolybdate d'ammonium que l'on dose l'acide phosphorique.

Anhydride carbonique. — L'anhydride carbonique a pour formule CO^2. L'air atmosphérique en contient à l'état libre. On le trouve dissous dans les eaux et combiné à la chaux dans les calcaires, les pierres à chaux et à ciment, les pierres de taille, etc. Il forme encore d'autres carbonates de variétés diverses.

L'anhydride carbonique, à la pression et à la température ordinaires, est un gaz incolore, plus lourd que l'air, inodore, de saveur aigrelette, rougissant le papier de tournesol. La potasse, la soude et la chaux l'absorbent avec une grande facilité.

Il se dissout très bien dans l'eau.

Chauffés au rouge, les carbonates abandonnent presque tous leur anhydride carbonique. Les carbonates des métaux lourds sont insolubles dans l'eau, mais plus ou moins facilement solubles dans une solution d'acide carbonique.

Quand on traite les carbonates par tous les acides libres

solubles dans l'eau, sauf les acides sulfhydrique et cyanhydrique, il y a décomposition et mise en liberté de l'anhydride carbonique.

L'eau de chaux et l'eau de baryte fournissent, avec l'acide carbonique ou avec un carbonate soluble, un précipité de carbonate neutre de calcium ou de baryum.

Le chlorure de calcium, le chlorure de baryum, l'azotate d'argent et le sulfate de magnésium donnent avec l'acide carbonique des précipités blancs (carbonates).

On dose l'acide carbonique pondéralement, volumétriquement ou par différence.

Acide chlorhydrique. — L'acide chlorhydrique est un gaz incolore répandant dans l'atmosphère d'abondantes fumées blanches dont l'odeur est extrêmement forte et piquante. Il se dissout très facilement dans l'eau. En dissolution concentrée, il forme l'acide chlorhydrique fumant qui, à une température peu élevée, perd une grande partie du gaz qui s'y trouve dissous.

Les chlorures métalliques, sauf les chlorures de plomb, d'argent et mercureux, sont aisément solubles dans l'eau.

Le chlorure de baryum ne donne pas de précipité dans une solution de chlorure de sodium.

L'azotate d'argent produit un précipité blanc de chlorure d'argent, insoluble dans l'acide azotique et soluble dans l'ammoniaque et le cyanure de potassium.

On reconnaît qu'une liqueur contient du chlore à l'odeur qu'elle dégage quand on la chauffe avec un peu d'acide sulfurique et de bioxyde de manganèse.

C'est surtout à l'état de chlorure d'argent ou au moyen de liqueurs titrées que l'on dose le chlore et l'acide chlorhydrique.

Acide silicique. — L'acide silicique ou silice est incolore ou blanc lorsqu'il est pur. Il est inaltérable. On le rencontre à l'état isolé (quartz, cristal de roche, grès, etc.) ou à l'état de combinaison dans un grand nombre de corps naturels (argiles, granites, roches primitives). Il est cristallisé ou amorphe. Il est insoluble dans l'eau et dans les acides, excepté

au moment de sa précipitation. Les silicates alcalins seuls sont solubles dans l'eau.

Traité par l'eau, le chlorure de silicium donne une masse gélatineuse plus ou moins facilement soluble dans les acides étendus. Le même phénomène se produit quand on ajoute de l'acide chlorhydrique à un silicate alcalin.

Evaporée à sec, la silice gélatineuse se transforme en une masse blanche, amorphe, totalement insoluble dans l'eau et dans les acides; c'est la silice anhydre SiO^2. A 200°, elle s'est complètement déshydratée.

En analyse, on distingue les silicates solubles dans l'eau (silicates de potassium et de sodium), les silicates insolubles dans l'eau, mais solubles dans les acides forts, et les silicates insolubles dans l'eau et dans les acides.

Tous les silicates sont attaqués par l'acide fluorhydrique gazeux. Il se forme du fluorure de silicium très volatil qui se dégage. C'est un moyen de séparation de la silice d'avec les bases.

Les silicates fondus avec le carbonate de potassium ou de sodium se décomposent en donnant naissance à un silicate alcalin soluble.

Le chlorure de baryum forme dans les solutions de silicates alcalins un précipité blanc de silicate de baryum soluble dans l'acide chlorhydrique.

Les acides chlorhydrique, azotique et sulfurique produisent dans les solutions concentrées de silicates alcalins un précipité de silice gélatineuse.

Le chlorure d'ammonium fournit aussi un précipité blanc de silice gélatineuse.

La silice se dose et se pèse à l'état anhydre.

TABLE POUR LE CALCUL DES ANALYSES

Comme on vient de le voir, les corps sont généralement pesés à l'état de composés définis. Il faut donc multiplier les poids ainsi lus par un coefficient (Voir p. 54 et 55) pour obtenir le poids du corps que l'on veut avoir.

ÉLÉMENTS	SUBSTANCE PESÉE	COEFFICIENT	CORPS CHERCHÉ
Aluminium ...	Alumine (Al^2O^3).	0,534	Aluminium.
Argent.....	Chlorure d'argent (AgCl).	0,753	Argent.
Arsenic	Arséniate ammoniaco-magnésien (AsO^4MgAzH^4) H^2O.	0,395 0,605	Arsenic. Anhydride arsénique.
Azote	Chloroplatinate d'ammonium ($PtCl^4,2AzH^4Cl$). Chlorure d'ammonium (AzH^4Cl).	0,064 0,078 0,318	Azote. Ammoniaque. Ammoniaque.
Baryum.....	Sulfate de baryum (SO^4Ba). Carbonate de baryum (CO^3Ba).	0,588 0,657 0,695 0,777	Baryum. Baryte. Baryum. Baryte.
Cadmium	Oxyde de cadmium (CdO). Sulfure de cadmium (CdS).	0,875 0,777	Cadmium. Cadmium.
Calcium.....	Chaux (CaO). Carbonate de calcium (CO^3Ca). Sulfate de calcium (SO^4Ca).	0,714 0,400 0,560 0,412 0,294	Calcium. Calcium. Chaux. Chaux. Calcium.
Carbone.....	Anhydride carbonique (CO^2). Carbonate de calcium (CO^3Ca).	0,273 0,440	Carbone. Anhydride carbonique.
Chlore	Chlorure d'argent (AgCl).	0,247 0,254	Chlore. Acide chlorhydrique.
Chrome	Oxyde de chrome (Cr^2O^3). Chromate de baryum (CrO^4Ba). Chromate de plomb (CrO^4Pb).	0,687 0,207 0,162	Chrome. Chrome. Chrome.
Cuivre	Oxyde de cuivre (CuO). Sulfure cuivreux (Cu^2S).	0,798 0,798	Cuivre. Cuivre.
Étain	Acide métastannique (SnO^2).	0,787	Etain.
Fer.....	Oxyde ferrique (Fe^2O^3).	0,700 0,900	Fer. Oxyde ferreux.
Hydrogène ...	Eau (H^2O).	0,111	Hydrogène.
Magnésium ...	Magnésie (MgO). Pyrophosphate de magnésium ($P^2O^7Mg^2$).	0,600 0,216 0,360	Magnésium. Magnésium. Magnésie.
Manganèse ...	Sulfure de manganèse (MnS). Oxyde salin de manganèse (Mn^3O^4).	0,815 0,907 0,720 0,930	Oxyde manganeux (MnO). Oxyde manganique (Mn^2O^3). Manganèse. Oxyde manganeux.
Nickel.....	Oxyde de nickel (NiO).	0,787	Nickel.
Phosphore....	Pyrophosphate de magnésium ($P^2O^7Mg^2$).	0,279 0,640	Phosphore. Anhydride phosphorique (P^2O^5).

ÉLÉMENTS	SUBSTANCE PESÉE	COEFFICIENT	CORPS CHERCHÉ
Plomb	Oxyde de plomb (PbO).	0,928	Plomb.
	Chlorure de plomb ($PbCl^2$).	0,745	Plomb.
		0,804	Oxyde de plomb (PbO).
	Sulfure de plomb (PbS).	0,866	Plomb.
		0,933	Oxyde de plomb.
	Sulfate de plomb (SO^4Pb).	0,683	Plomb.
		0,736	Plomb.
Potassium	Chlorure de potassium (KCl).	0,523	Potassium.
		0,631	Potasse (K^2O).
	Sulfate de potassium (SO^4K^2).	0,449	Potassium.
		0,540	Potasse.
Silicium.....	Silice (SiO^2).	0,467	Silicium.
Sodium	Chlorure de sodium (NaCl).	0,393	Sodium.
		0,530	Soude (Na^2O).
	Sulfate de sodium (SO^4Na^2).	0,324	Sodium.
	Carbonate de sodium (CO^3Na^2).	0,437	Soude.
		0,585	Soude.
Soufre	Sulfate de baryum (SO^4Ba).	0,137	Soufre.
		0,343	Anhydride sulfurique.
	Sulfure d'arsenic (As^2S^3).	0,390	Soufre.
Zinc.....	Oxyde de zinc (ZnO).	0,804	Zinc.
	Sulfure de zinc (ZnS).	0,670	Zinc.

La table précédente donne, à la suite de l'élément et de la substance pesée, le coefficient, c'est-à-dire le multiplicateur qui, appliqué au poids obtenu, donne le poids du corps cherché.

Dans la table suivante de la page 56, on trouve à la suite des noms et symboles des corps simples les poids atomiques des corps usuels cités dans le cours de l'ouvrage.

Il est à noter que ces poids atomiques (pas plus d'ailleurs que les équivalents de l'ancienne notation) ne représentent pas des nombres absolus. Des déterminations faites avec la plus grande précision offrent, pour un même corps, des divergences faibles, il est vrai, mais réelles.

Les valeurs ci-après sont celles qui sont le plus communément adoptées.

Le tableau de la page 56 permet de calculer aisément les poids moléculaires des corps composés.

POIDS ATOMIQUES DES CORPS SIMPLES

CORPS SIMPLES	SYMBOLES	POIDS ATOMIQUES	CORPS SIMPLES	SYMBOLES	POIDS ATOMIQUES
Aluminium ...	Al	27,5	Magnésium ...	Mg	24
Antimoine	Sb	120	Manganèse ...	Mn	55
Argent.....	Ag	108	Mercure.....	Hg	200
Arsenic.....	As	75	Molybdène....	Mo	96
Azote.....	Az	14	Nickel.....	Ni	59
Baryum.....	Ba	137	Or.....	Au	196,7
Bismuth	Bi	207,5	Oxygène.....	O	16
Bore.....	Bo	11	Phosphore....	P	31
Brome	Br	80	Platine.....	Pt	196
Cadmium.....	Cd	112	Plomb	Pb	207
Calcium.....	Ca	40	Potassium	K	39
Carbone.....	C	12	Silicium.....	Si	28
Chlore	Cl	35,5	Sodium.....	Na	23
Chrome.....	Cr	52,5	Soufre	S	32
Cobalt	Co	59	Strontium	St	87,5
Cuivre.....	Cu	63,3	Thallium	Tl	203,7
Etain.....	Sn	118	Titane.....	Ti	50
Fer.....	Fe	56	Tungstène....	Tu	183,5
Fluor	Fl	19	Uranium	U	239
Hydrogène ...	H	1	Vanadium	V	51,2
Iode	I	127	Zinc	Zn	65
Lithium	Li	7			

Soit, par exemple, à déterminer le poids moléculaire du pyrophosphate de magnésium, $P^2O^7Mg^2$.

Le tableau ci-dessus donne les poids atomiques :

$$P = 31, \quad O = 16, \quad Mg = 24,$$

c'est-à-dire $P^2 = 62$, $O^7 = 112$, $Mg^2 = 48$.

Par conséquent le poids moléculaire cherché de $P^2O^7Mg^2$ est

$$62 + 112 + 48 = 222,$$

duquel on déduit la teneur en phosphore pour 1 gramme.

En effet :

222 gr. de $P^2O^7Mg^2$ renferment 62 gr. de phosphore ;

1 gr. — renferme $\frac{62}{222} = 0{,}279$ de phosphore.

Ce coefficient, inscrit dans la table de la page 54, sert au calcul de la teneur en phosphore d'un acier (page 385).

B. — RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE PHYSIQUE

CHAPITRE VII

PROPRIÉTÉS DE LA MATIÈRE. — PESANTEUR

La physique a pour base la méthode expérimentale déduite des faits d'observation, d'expérimentation et de généralisation.

États physiques des corps. — Les corps se présentent à nos sens sous trois aspects différents : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Ces aspects constituent les états physiques de la matière.

Les corps solides possèdent une forme et un volume déterminés; tels sont les matériaux de construction. Ils résistent plus ou moins aux efforts mécaniques auxquels on les soumet : compression, traction, flexion, torsion, etc.

Les corps liquides n'ont d'autre forme que celle des vases qui les renferment. Cette forme change facilement, sans cependant que le volume varie. Les liquides résistent énergiquement aux efforts de compression.

Les corps gazeux n'ont ni forme ni volume déterminés. Ils se laissent réduire à un moindre volume lorsqu'on les soumet à la compression. On trouve une application de cette propriété aux travaux publics dans les fondations faites au

moyen de l'air comprimé. Une autre propriété caractéristique des gaz est l'expansibilité.

Les liquides sont donc des fluides incompressibles et les gaz des fluides compressibles.

Il faut d'ailleurs remarquer qu'il n'y a pas une ligne de démarcation absolue entre les divers états et que des états intermédiaires peuvent exister, comme la viscosité, par exemple. De plus, un même corps se présente quelquefois sous les trois états (ex. : glace, eau, vapeur d'eau).

Propriétés physiques. — L'*inertie* est une propriété générale de la matière consistant dans la résistance qu'elle oppose au mouvement ou au changement de mouvement.

L'*étendue* est la propriété que possèdent les corps d'occuper une partie limitée de l'espace.

L'*impénétrabilité* fait que deux corps ne peuvent exister en un même endroit de l'espace.

Les corps peuvent être divisés en particules indéfiniment petites. Ainsi la *divisibilité* de la matière est telle qu'on peut examiner certaines portions de solides qui sont inférieures à un micron (μ). Des feuilles d'or ont une épaisseur de 0,1 μ; des bulles de savon ont 0,00¼ μ dans la partie faible de leur paroi.

On est obligé d'admettre toutefois une limite théorique que l'on ne peut dépasser dans la division de la matière. L'élément primaire que l'on conçoit comme étant le plus petit a reçu le nom d'*atome*. La *molécule* est la réunion des atomes formant la composition chimique d'une substance.

Mesures. — Pour comparer deux ou plusieurs grandeurs entre elles, on a recours à des instruments spéciaux et on convient d'une grandeur fixe et invariable qui est l'unité représentée par un étalon.

En physique, il y a trois unités fondamentales :

L'unité de longueur (le centimètre);

L'unité de masse (le gramme);

L'unité de temps (la seconde);

dont l'ensemble constitue le système C. G. S. (centimètre — gramme — seconde).

Le centimètre est la centième partie du mètre qui, lui-même, est la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre.

Le gramme est la millième partie du kilogramme. C'est la masse d'un centimètre cube d'eau distillée à la température de 4° centigrades.

La seconde est la $\frac{1}{86.400}$ partie du jour solaire moyen.

Les unités dérivées sont :

L'unité de vitesse : c'est la vitesse d'un mobile animé d'un mouvement rectiligne et uniforme parcourant 1 centimètre en 1 seconde ;

L'unité d'accélération : c'est l'accélération d'un mobile dont la vitesse s'augmente de 1 unité de vitesse en 1 seconde ;

L'unité de force (dyne) : c'est la force imprimant l'unité d'accélération à une masse de 1 gramme ;

L'unité de travail, d'énergie et de force vive (erg) : c'est le travail de 1 dyne dont le point d'application se déplace de 1 centimètre dans sa direction ;

Le kilogrammètre : c'est le travail résultant de la chute de 1 kilogramme-poids tombant d'une hauteur de 1 mètre.

Les multiples et sous-multiples de ces unités s'expriment par les préfixes suivants :

MULTIPLES

méga ou még	valant	1.000.000	unités
myria	—	10.000	—
kilo	—	1.000	—
hecto	—	100	—
déca	—	10	—

SOUS-MULTIPLES

déci	valant	0,1	unités
centi	—	0,01	—
milli	—	0,001	—
micro ou micr	—	0,000,001	—

Les grandeurs mesurables géométriquement sont les lon

gueurs, les surfaces, les volumes, les angles plans dièdres et polyèdres.

La longueur rectiligne s'évalue à l'aide d'une règle divisée *cd*. Les divisions de cette règle peuvent être espacées de demi en demi-millimètre. Lorsqu'il s'agit d'une mesure de précision, l'espace compris entre deux divisions est encore trop

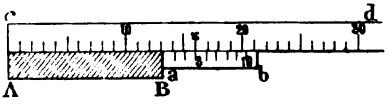

Fig. 27. — Vernier.

grand. On est alors amené à se servir d'un *vernier* adjoint à la règle. Le vernier (*fig.* 27) est une réglette divisée pouvant glisser le long d'une grande règle également divisée. La longueur du vernier est égale à 9 divisions de la grande règle, soit 9 millimètres. Par conséquent, chacune de ses divisions est $\frac{1}{10}$ de millimètre plus petite que la division correspondante de la règle. C'est le vernier au dixième.

En plaçant un objet AB le long de la grande règle, on constate que sa longueur est égale, par exemple, à 13 divisions plus une fraction. Cette fraction se trouve en cherchant où est la correspondance de deux traits du vernier *ab*. Soit 3 divisions l'endroit où s'observe cette correspondance. La longueur mesurée sur le vernier sera 3 dixièmes de millimètre. La longueur totale sera donc de $13^{mm},3$.

On construit des verniers au $\frac{1}{20}$ et au $\frac{1}{50}$ de millimètre basés sur le même principe. De plus, le vernier, au lieu d'être rectiligne, peut être circulaire.

Les longueurs des lignes courbes s'apprécient encore, mais d'une manière approximative, à l'aide du curvimètre bien connu des dessinateurs et des ingénieurs.

Le pied à coulisse (*fig.* 28), d'un usage si fréquent dans les ateliers, se compose d'une règle métallique divisée en millimètres, dont l'extrémité est pourvue d'un butoir. On place l'objet le long de cette règle ; on fait glisser contre lui un

second butoir que l'on fixe au moyen d'une vis de pression. Quelquefois on adapte une vis de rappel qui permet le lent déplacement d'un vernier. L'objet placé entre les deux butoirs peut être ainsi mesuré à $\frac{1}{10}$ de millimètre près.

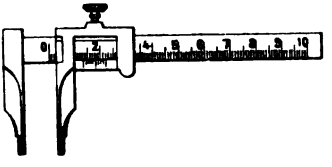

Fig. 28. — Pied à coulisse.

Vis micrométrique. — C'est une vis dont le pas parfaitement régulier est de 1 millimètre ou de 1/2 millimètre. Elle est construite sur le principe de l'hélice. Si l'on suppose l'écrou mobile, l'un quelconque de ses points s'avance sur la vis en décrivant une hélice qui constitue le filet. Le déplacement longitudinal de ce point, et par suite de l'écrou tout entier, est proportionnel à l'angle de rotation de la tête de la vis.

On taille cette vis sur le pourtour d'un cylindre bien homogène en acier fondu ou en bronze.

La vis micrométrique constitue la base essentielle de beaucoup d'instruments de précision, tels que le sphéromètre, le palmer, le cathétomètre, la machine à diviser, le comparateur, etc.

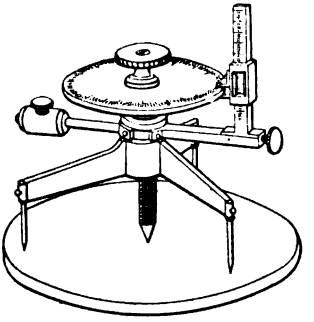

Fig. 29. — Sphéromètre.

Le sphéromètre (*fig.* 29) sert à la mesure de faibles épaisseurs, à la vérification de la courbure des surfaces sphériques et à la mesure de leur rayon. Une vis micrométrique mobile dans un écrou fixe placé au centre d'un trépied, reposant sur un plan par trois

pointes fines en acier trempé, se déplace en entraînant avec elle un disque mince portant un limbe gradué. La pointe inférieure de la vis est amenée contre l'objet à mesurer. Une règle verticale graduée fait connaître le déplacement de la vis.

Le palmer (*fig.* 30) consiste en une vis micrométrique avec écrou fixe, dont le déplacement est indiqué sur un manchon divisé sur son pourtour et glissant sur un cylindre intérieur gradué sur l'une de ses génératrices. L'objet se place entre l'extrémité de la vis et le butoir.

Fig. 30. Palmer.

Le cathétomètre sert à mesurer la différence de hauteur qui existe entre deux points. Il se compose d'une tige verticale graduée le long de laquelle glisse une lunette horizontale qui sert à viser successivement les deux points considérés. La différence entre les deux lectures de la règle donne la hauteur cherchée. Le réglage de l'appareil est assez délicat. Des pièces nombreuses permettent d'assurer l'horizontalité et la verticalité de certaines parties. L'adjonction d'une vis micrométrique offre une garantie de précision dans la lecture des divisions.

La vis micrométrique est encore utilisée dans d'autres instruments, par exemple dans le microtome, qui sert à obtenir une coupe d'une épaisseur faible et connue d'une substance solide quelconque (bois, tissus, etc.).

Mesure des surfaces. — Les formules géométriques sont d'un emploi journalier pour la détermination de la surface des corps. Elles sont basées sur la mesure de certaines longueurs appropriées à la forme des figures.

En pratique, on mesure quelquefois une surface en superposant un papier quadrillé transparent, divisé en carrés assez petits dont on compte le nombre; on évalue au jugé les carrés incomplets. On peut aussi dessiner le contour extérieur sur un papier quadrillé.

D'autres fois, on découpe un carton sur lequel on a tracé le pourtour extérieur de la figure plane. On fait la même opération sur un carton identique pour l'unité de surface. On pèse ces cartons séparément. Connaissant les poids res-

pectifs des deux morceaux de carton, il est facile d'en déduire la superficie cherchée.

Le planimètre est un appareil qui sert à mesurer une surface d'après son contour en conservant un point fixe.

Ces procédés pratiques ne donnent d'ailleurs qu'un résultat approximatif.

Mesure des volumes. — Les instruments de mesure des volumes seront décrits plus loin.

Mesure des masses. — Les masses et les poids se mesurent à l'aide de la balance.

La balance de précision se compose d'un fléau aux extrémités duquel sont suspendus, à l'aide de couteaux, deux plateaux de même poids. Le fléau oscille autour d'un couteau médian reposant sur un plan horizontal en agate. Les couteaux extrêmes ont leur arête tournée vers le haut; le couteau médian a son arête dirigée vers le bas. Ces trois arêtes sont parallèles et horizontales. Le fléau porte une aiguille qui se déplace avec lui. L'extrémité de cette aiguille oscille devant un arc gradué.

La balance est en équilibre quand l'aiguille s'arrête au zéro ou quand elle oscille à des distances égales de côté et d'autre de ce zéro.

La balance comprend une série d'organes accessoires qui ont chacun leur utilité. Sa forme varie d'ailleurs suivant les constructeurs qui apportent des modifications nécessitées par l'usage spécial auquel l'appareil est destiné. Une cage en verre entoure la balance et la met à l'abri des courants d'air et des causes de détérioration. Une boîte, appelée série de poids, accompagne chaque balance.

Une balance doit être à la fois juste et sensible.

Elle est juste quand son fléau conserve la même position d'équilibre, les plateaux étant vides ou chargés de poids égaux.

Les conditions de justesse sont les suivantes :

1° Le centre de gravité de la partie mobile (fléau, plateau, etc.) doit être sur la verticale du point de suspension quand le fléau est en équilibre;

2° Les deux bras du fléau doivent être égaux.

La balance est sensible quand un faible poids mis sur l'un

des plateaux, dans sa position d'équilibre, lui fait nettement prendre une position inclinée. Une balance sensible au milligramme est celle dont le plateau s'incline par l'addition d'un poids d'un milligramme.

La balance est d'autant plus sensible :

1° Que les bras du fléau sont plus longs ;

2° Que le poids de la partie mobile est plus faible ;

3° Que le centre de gravité est plus rapproché de l'axe de suspension.

Les trois axes de suspension (ceux des plateaux et celui du fléau) doivent être dans un même plan horizontal.

Dans le commerce, on se sert de la balance de Roberval.

Méthodes de pesées. — 1° Simple pesée. — C'est la pesée ordinaire, dans laquelle l'un des plateaux reçoit le corps à peser et l'autre des poids marqués jusqu'à ce qu'il y ait équilibre. Cette méthode, qui suppose que les deux bras du fléau sont rigoureusement égaux, n'est pas employée en physique ni en chimie.

2° Double pesée ou pesée de Borda. — On place le corps à peser dans l'un des plateaux de la balance. On fait équilibre dans l'autre plateau au moyen d'une tare, c'est-à-dire en ajoutant de la grenaille de plomb ou du sable. Puis, retirant le corps du premier plateau, on le remplace par des poids marqués jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli. On a ainsi le poids du corps.

Balance romaine. — La romaine (*fig.* 31) se compose d'un

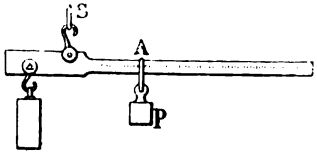

Fig. 31. — Romaine.

levier métallique à bras inégaux ayant un point de suspension en S. L'extrémité de l'un des bras porte un plateau ou

crochet devant recevoir le corps à peser. Sur l'autre bras se trouve une graduation le long de laquelle se déplace un anneau A portant un poids constant *p*. On arrête le déplacement de cet anneau lorsque le fléau est horizontal. On lit la division marquée et on a de suite le poids du corps. L'appareil est étalonné avec des poids connus.

Le principe de la romaine se retrouve dans beaucoup d'appareils d'essais de matériaux.

Pour connaître le poids de fardeaux lourds ou encombrants, on a recours à la bascule bien connue de Quintenz.

Mesure des forces. — Une force peut se mesurer directement à l'aide d'un dynamomètre, appareil fondé sur l'élasticité d'un corps solide.

Le dynamomètre le plus simple est le peson.

Le peson (*fig.* 32) se compose d'un ressort d'acier recourbé aux extrémités duquel sont fixées deux lames courtes et

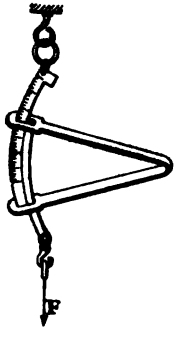

Fig. 32. — Peson.

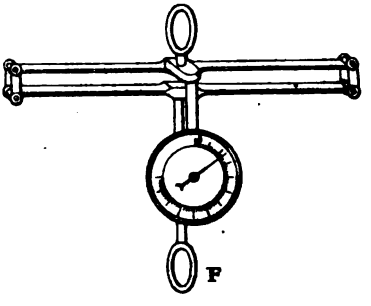

Fig. 33. — Dynamomètre Poncelet.

rigides, légèrement courbes, s'engageant dans des œilletons pratiqués dans ce ressort. Ces lames glissent l'une sur l'autre en sens contraire. Un anneau termine la partie libre d'une des lames ; l'autre lame est munie d'un crochet auquel on suspend le corps à peser F. Le poids de l'objet rapproche les deux parties extrêmes du ressort d'acier. L'effort produit se lit sur une échelle graduée établie par comparaison.

Le dynamomètre de Poncelet (*fig.* 33) est constitué par deux

ressorts d'acier dont les extrémités sont articulées à celles de deux lames courtes et rigides. A l'état de repos, les ressorts sont parallèles ; mais, sous l'influence d'un effort F, ils se courbent en s'écartant. Cet écartement produit la déviation d'une aiguille mobile sur un cadran divisé. Grâce à ce dispositif, une simple lecture donne la mesure de la traction exercée.

Pour mesurer l'effort de torsion d'une tige métallique élastique et écrouie, on fixe celle-ci dans un étau *fig.* 34 par une de ses extrémités et on serre l'autre extrémité dans une pince placée au centre d'une poupée de tour graduée sur le pourtour et pouvant tourner devant une aiguille fixe servant de repère. Sur cette poupée, on enroule une corde à laquelle on suspend des poids à l'un des bouts. On trouve que la rotation de la poupée est fonction du moment de la force par rapport à l'axe.

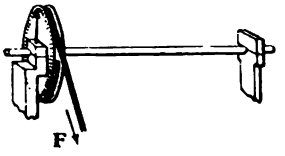

Fig. 34. — Mesure de la torsion.

Pour une tige affectant une forme cylindrique, la torsion est inversement proportionnelle à la 4e puissance du diamètre de la tige.

Lois de la chute des corps. — Ces lois, au nombre de deux, sont les suivantes :

1° Loi des espaces. — Les espaces parcourus e varient comme les carrés des temps t employés à les parcourir :

$$e = \frac{gt^2}{2}.$$

2° Loi des vitesses. — Les vitesses v sont proportionnelles aux temps t :

$$v = gt.$$

Dans ces formules, g est l'accélération due à la pesanteur.

CHAPITRE VIII

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES CORPS

Mouvement. — Un corps est en mouvement par rapport à un système de points fixes quand les distances de chacun de ces points fixes varient avec le temps.

Un corps est en repos par rapport à un autre corps quand aucune des parties qui le composent n'est en mouvement par rapport à cet autre corps.

La trajectoire d'un mobile est le lieu des positions successives de ce mobile.

La relation entre les espaces parcourus sur cette trajectoire, à partir d'un point considéré, et les temps employés à les parcourir, donne la loi du mouvement. L'équation du

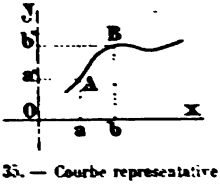

Fig. 35. — Courbe représentative du mouvement.

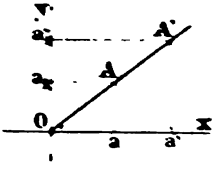

Fig. 36. — Courbe représentative du mouvement uniforme.

mouvement définit la relation entre les deux variables, l'espace et le temps. Cette équation se traduit graphiquement par une courbe représentative du mouvement, telle par exemple que celle de la figure 35, dans la quelle les abscisses

correspondent aux temps écoulés et les ordonnées aux espaces parcourus pendant ces temps.

Le mouvement le plus simple est le mouvement uniforme, dans lequel les espaces parcourus dans des temps égaux sont égaux, autrement dit dans lequel les distances d'un point à l'origine augmentent proportionnellement au temps. Dans ce mouvement, la courbe représentative est une ligne droite (*fig.* 36).

Le mouvement non uniforme est varié. La courbe n'est plus alors figurée par une ligne droite.

Dans le mouvement varié, on distingue le mouvement uniformément varié, dans lequel les vitesses varient proportionnellement aux temps. Ce mouvement est lui-même uniformément accéléré ou uniformément retardé.

Dans le mouvement périodique général, le mobile repasse au même point et dans le même sens à des intervalles de temps égaux. La valeur commune de ces intervalles est la période du mouvement.

Dans le mouvement périodique uniforme, le retour du point mobile à une portion déterminée et dans le même sens se fait toujours après le même temps, qui est la durée de la période.

L'unité de travail, dont il est souvent question en mécanique, est donnée par la formule

$$T = F \times e,$$

F étant l'intensité de la force évaluée en unités de force, *e* étant l'espace évalué en unités de longueur.

C'est ce que l'on exprime encore en disant que le travail d'une force est égal à l'unité de force transportant son point d'application d'une unité de longueur dans sa propre direction. Dans le système C. G. S., c'est le travail de 1 dyne déplaçant son point d'application de 1 centimètre ; on lui donne le nom d'*erg*. Cette unité étant trop petite, on emploie de préférence un multiple, le *mégerg*, valant un million d'ergs, et le *joule*, correspondant à 10 mégergs. On a vu plus haut que, dans la pratique industrielle, l'unité adoptée était le kilo-

grammètre. Dans les essais de matériaux, on a très souvent l'occasion de se servir de cette dernière unité.

La puissance d'un moteur est la quantité de travail qu'il peut fournir pendant l'unité de temps. L'unité réelle C. G. S. de puissance est l'erg par seconde, que l'on remplace plus commodément par une unité secondaire 10^7 fois plus grande, le *watt*, qui est la puissance d'un moteur effectuant 1 joule par seconde. Dans les machines importantes, on exprime la puissance en hectowatts ou en kilowatts.

Dans le système métrique, l'unité de puissance est le kilogrammètre par seconde.

On emploie encore en mécanique, comme unité de puissance, le cheval-vapeur effectuant un travail de 75 kilogrammètres par seconde. Une mesure plus logique, le *poncelet*, vaut 100 kilogrammètres par seconde ; elle correspond sensiblement au kilowatt des électriciens.

Indépendamment des propriétés physiques déjà rappelées (inertie, étendue, impénétrabilité, divisibilité), la matière présente un certain nombre de propriétés mécaniques : l'élasticité, la ténacité, la compression, la flexion, le choc, etc.

Élasticité. — Les particules d'un corps exercent les unes sur les autres des forces qu'il est impossible de mesurer expérimentalement et auxquelles on donne le nom de forces intérieures, par opposition aux forces extérieures que l'on peut mesurer.

Une force extérieure appliquée sur un corps produit sur ce corps une déformation plus ou moins grande. Quand cette déformation disparaît, c'est-à-dire quand le corps revient exactement à sa position primitive, on dit que le corps est élastique ou qu'il a produit une déformation élastique. Pendant ce phénomène, le corps obéit à la loi suivante, connue sous le nom de loi de Hooke :

La variation de forme d'un corps élastique est proportionnelle à la force qui la détermine, quand celle-ci est petite, et change de sens avec elle.

Ainsi, un fil de cuivre recuit fixé par une de ses extrémités et chargé, à l'autre, de poids croissants, donne un allongement d'autant plus grand que la charge est plus forte,

mais cet allongement n'est pas proportionnel à la charge. Le graphique ci-dessous (*fig.* 37) montre la loi des variations ; cette loi est représentée par la courbe OAA'. L'allongement produit peut atteindre 40 centimètres sans qu'il y ait rupture. Mais si, avant d'atteindre cet allongement, on retire peu à peu les poids à partir d'une certaine valeur OP, le fil subit un raccourcissement, et, quand la charge est devenue nulle, on observe une contraction assez faible. Le fil a conservé un allongement permanent O*a*. La ligne figurative de cette période est A*a* ; si l'on recommence l'expérience précédente, on s'aperçoit que, pour la valeur OP, la courbe sera représentée par la ligne *a*A. Au-delà de la charge OP, les nouveaux allongements sont partiellement permanents et moins grands que les précédents. OP forme donc la limite d'élasticité ou limite élastique du corps considéré.

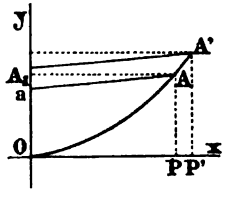

Fig. 37. — Graphique des variations d'allongement.

La traction opérée sur le fil de cuivre a eu en outre un autre effet, celui de modifier le métal, qui, de mou qu'il était, est devenu écroui, c'est-à-dire dur et résistant. Si l'on recommence l'expérience précédente, on constatera que la courbe OA est encore la même, mais le point A sera reporté plus loin en A' et la valeur OP deviendra OP'. OP' sera la nouvelle limite élastique due à l'écrouissage.

Le laminage et le tréfilage produisent le même effet que l'écrouissage.

Dans les phénomènes précédents, on constate que, dans un fil sain, la densité et le volume n'ont pas varié. La section s'est donc réduite d'une certaine quantité. La ligne *a*A qui représente le déplacement du point figuratif se rapproche beaucoup d'une ligne droite. On l'appelle courbe d'élasticité et on admet que les allongements élastiques sont proportionnels aux charges.

De ce qui précède, il résulte que l'allongement l est directement proportionnel à la longueur L du fil ou d'une barre et à l'effort de traction F ; il est, en outre, inversement pro-

portionnel à la section s du fil ou de la barre et à un facteur numérique constant E qu'on désigne sous le nom de coefficient d'élasticité. Cette loi peut donc se traduire par la formule :

$$l = \frac{L \times F}{E \times s},$$

que l'on met aussi sous la forme :

$$l = \xi \times \frac{LF}{s},$$

$\frac{1}{E}$ étant le coefficient de souplesse.

Le coefficient d'élasticité E dépend des unités choisies pour la mesure de la section et de la charge. Il est d'usage d'exprimer la section en millimètres carrés et la charge en kilogrammes-poids. Le coefficient d'élasticité varie pour le fer et l'acier de 18.000 à 22.000. Pour la fonte, le cuivre, l'aluminium et le zinc, il est compris entre 6.400 et 10.000. Si l'on appliquait les conventions du système C. G. S., le coefficient E, qui est, par exemple, 20.000 pour un des corps ci-dessus, serait représenté par 2×10^{12}, la tension F étant évaluée en dynes et la section s en centimètres carrés.

Dans la loi de Hooke, il faut remarquer que la proportionnalité des efforts aux déformations ne s'applique qu'à de petits efforts. On a constaté, en outre, que cette proportionnalité cesse fréquemment au-dessous de la limite d'élasticité.

Ténacité ; résistance à la rupture. — Soumis à un effort de traction de plus en plus grand, le fil, qui dans le cas précédent revenait à sa position initiale ou se déformait suivant qu'il se trouvait en deçà ou au delà de la limite élastique, finit par se rompre. L'effort de traction amenant la rupture mesure la ténacité du fil. Cette charge s'exprime pratiquement en kilogrammes par section d'un millimètre carré (métaux) ou d'un centimètre carré (bois ou autres matériaux), ou encore en mégabaries (1 barie = 1 dyne par centimètre carré).

L'élévation de température diminue la ténacité ; le travail mécanique, au contraire, l'augmente. La structure des corps exerce aussi une influence manifeste sur les résultats de la ténacité.

La charge pratique est celle que peut supporter un corps en toute sécurité. Elle est toujours inférieure à la charge de rupture et à la charge limite d'élasticité.

Le coefficient de sécurité est le rapport de la charge de rupture à la charge pratique. Il varie avec les conditions d'emploi. En général, il est de 4 à 6 pour les métaux et de 10 pour les bois.

Compression ; écrasement. — Si la résistance à la rupture par traction est intéressante à connaître pour certains corps qui, comme les fers et les aciers, sont soumis en pratique à des efforts de traction, il est une autre forme de la résistance non moins importante à étudier : c'est la compression à laquelle sont soumis nombre de matériaux de construction.

Comme pour la traction, un corps soumis à la compression revient dans sa position initiale lorsque la limite n'a pas été dépassée, c'est-à-dire lorsque l'effort n'était pas trop considérable. Il y a une limite élastique de compression ; il y a également des déformations élastiques et des déformations permanentes.

Si l'effort devient de plus en plus grand, il y a écrasement, phénomène analogue à la rupture dans la traction.

Flexion. — Une barre AB encastrée à une de ses extrémités A fléchit lorsqu'on exerce sur son autre extrémité B un effort F normal à sa direction (*fig.* 38). La flexion produite est proportionnelle à la force exercée lorsque celle-ci est petite. Si l'on vient à supprimer cet effort, la barre libérée reprend sa position primitive après une succession d'oscillations isochrones. Mais, de même que dans les cas de traction et de compression, lorsqu'une certaine limite a été dépassée, la barre conserve une déformation

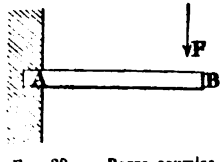

Fig. 38. — Barre soumise à la flexion.

résiduelle, si toutefois la force employée n'a pas amené sa rupture.

L'effort F déterminant larupture est donné par la formule :

$$F = \frac{1}{6}\frac{Kle^2}{L},$$

K étant un coefficient numérique variable avec chaque corps ; l, e, L, la largeur, l'épaisseur et la longueur de la barre.

Si la barre repose librement par ses extrémités sur deux appuis, la force agissant en son milieu sera d'une intensité quatre fois plus forte pour amener la rupture. Si la barre est encastrée, la force déterminant la rupture sera huit fois plus grande.

On a constaté que la résistance à la flexion d'un tube évidé est supérieure à celle qu'offre un tube plein de même matière. Cette précieuse propriété est mise en pratique dans l'industrie.

Torsion. — Un fil (ou une barre) saisi à une extrémité et soumis à un effort de torsion détermine la production d'un couple dont les forces sont situées dans un plan perpendiculaire à la direction. Il y a, là encore, une limite au-dessous de laquelle la barre reprend sa forme primitive, après un certain nombre d'oscillations isochrones. Avec un effort plus grand, il y a torsion résiduelle, puis rupture.

Les lois de la torsion, formulées par Coulomb, sont les suivantes :

1° Pour un même fil, l'angle de torsion est proportionnel au couple de torsion ;

2° L'angle de torsion est proportionnel à la longueur du fil ;

3° L'angle de torsion est en raison inverse du rayon du fil.

Le ressort à boudin est une application de l'élasticité de torsion.

Le moment de torsion a pour expression :

$$M = Fl \text{ dynes-cm},$$

F étant la force en dynes exercée au bout d'un bras de levier l (en centimètres), perpendiculairement à ce levier.

Dans le système mécanique, on exprime la force en kilogrammes, le bras de levier en mètres et le moment de torsion en kilogrammètres.

Choc. — Au lieu d'une action graduée comme dans les cas précédents, les corps peuvent subir une action brusque appelée *choc*. L'effort exercé de cette façon peut déterminer, comme précédemment, suivant son intensité, des déformations élastiques ou permanentes et la rupture.

Toutes ces propriétés mécaniques des corps entrent continuellement en jeu dans l'art de la construction. Aussi est-il indispensable, dans la réception des matériaux, de chercher quelle est la valeur de chacune d'elles, afin de savoir si les corps que l'on veut employer répondent bien à l'usage auquel on les destine.

PRINCIPES ET THÉORÈMES DE MÉCANIQUE

A. — Cinématique

Mouvement rectiligne uniformément varié. — Ce mouvement est caractérisé par les deux lois suivantes :

1° Les vitesses acquises croissent proportionnellement aux temps employés à les acquérir ;

2° Les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.

Ces deux lois se traduisent par les formules suivantes :

$$e = \frac{1}{2}\gamma t^2, \tag{1}$$

$$V_t = \gamma t, \tag{2}$$

dans lesquelles γ représente l'accélération, e l'espace parcouru par le mobile à partir de l'instant où il a commencé à se déplacer, V_t la vitesse au bout du même temps t.

B. — Statique

Composition d'un nombre quelconque de forces appliquées à un corps solide. — Théorème. — Toutes les forces appliquées à un corps solide peuvent se réduire à deux, dont une passe par un point A choisi à volonté.

Résultante d'un nombre quelconque de forces parallèles. — Théorème. — Le moment de la résultante par rapport à un axe quelconque est la somme algébrique des moments des composantes.

C. — Dynamique

Principe de l'inertie. — 1° Un corps ne peut rien changer de lui-même à son état de repos ni à son état de mouvement;

2° Si un corps libre n'est sollicité par aucune force, ce corps est ou bien en repos ou bien animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme.

Principe du mouvement relatif. — Dans un système de points matériels animés d'un mouvement de translation, toute force qui agit sur l'un d'eux lui imprime le même déplacement par rapport aux autres que si le système était en repos.

Principe de la réaction égale et contraire à l'action. — Lorsque, dans un système de points matériels, un point A

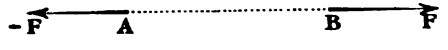

Fig. 39. — Action et réaction.

(*fig.* 39) exerce sur un autre point B une action représentée par une force F dirigée suivant la droite qui joint les deux points, inversement le point B exerce sur le point A une

réaction, représentée par une force (— F) dirigée suivant la même droite et égale, mais opposée, à la force F.

Théorème du travail ou des forces vives. — 1° *Cas d'un point matériel.* — **Le travail effectué par une force pour amener un point matériel d'une position à une autre sur sa trajectoire est égal à la variation de puissance vive qu'a subie le point matériel pendant ce déplacement.**

L'équation des forces vives est la suivante :

$$T = \frac{1}{2} m (V^2 - V_0^2),$$

dans laquelle m est la masse du point matériel, V_0 sa vitesse initiale, V sa vitesse finale, et T le travail accompli par la force.

2° *Cas d'un système.* — Dans le cas d'un système de points matériels soumis à l'action d'un système de forces quelconques, la demi-variation de la force vive totale du système est égale à la somme algébrique des travaux effectués par les forces qui agissent sur lui.

Principe de la conservation de l'énergie. — Un système ne peut gagner ou perdre du travail sans se modifier.

CHAPITRE IX

HYDROSTATIQUE

Presse hydraulique. — La presse hydraulique est une application directe du principe de la transmission des pressions ou principe de Pascal, que l'on peut énoncer ainsi :

Si la pression en un point d'un liquide en équilibre varie de q *sans que l'état de celui-ci soit modifié, elle varie aussi de* q *en tous les autres points du liquide.*

Comme corollaire à ce principe, on en déduit que, si deux ouvertures sont pratiquées dans un vase rempli d'un liquide, les pressions sont proportionnelles aux surfaces pressées. L'équation de ce corollaire peut se mettre sous cette forme :

$$\frac{P}{P'} = \frac{S}{S'},$$

P étant la pression exercée sur S, P′ étant la pression exercée sur S′.

Des pressions considérables peuvent être produites au moyen de forces assez faibles en faisant usage de la presse hydraulique.

La presse hydraulique (*fig.* 40) comprend deux corps de pompe, l'un de grand diamètre, l'autre de petit diamètre, réunis par un tuyau muni d'un robinet. Dans chaque corps de pompe monte et descend un cylindre plein faisant l'office de piston. Le cylindre P de large diamètre supporte un plateau A qui se déplace avec lui. Au-dessus de ce plateau se trouve un autre plateau B fixé sur quatre colonnes montantes. L'objet

à presser est placé entre ces deux plateaux. Une pompe d'injection munie d'un levier O aspire l'eau d'une bâche C et la refoule dans le corps de pompe D par le tuyau T. Le cylindre P et le plateau A se soulèvent et compriment le corps. Un jeu de soupapes S et S' s'oppose à tout mouvement rétrograde de l'eau.

On assure l'étanchéité entre le piston et le cylindre en

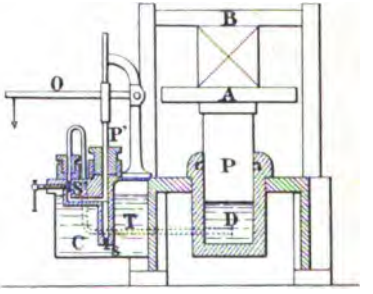

Fig. 40. — Presse hydraulique.

interposant un cuir embouti ayant la forme d'un ∩ que la pression applique contre la paroi supérieure du corps de pompe.

Si la différence de section entre les deux cylindres est dans le rapport de 1 à 200 avec un bras de levier de 1 à 5, la force développée est de $200 \times 5 = 1.000$ fois plus grande sur le plateau que sur le petit piston. Si, d'autre part, l'effort exercé sur le levier est de 30 kilogrammes, la pression transmise au corps pressé est de $30 \times 1.000 = 30.000$ kilogrammes ou 30 tonnes, en faisant abstraction, bien entendu, des frottements et des résistances.

Un manomètre enregistre la pression exercée.

La presse à forger est une application de la presse hydraulique.

Manomètres. — Les manomètres sont des instruments qui servent à mesurer la pression d'un gaz.

L'unité de pression C. G. S. correspond à une pression de

1 dyne par centimètre carré. Comme cette unité ne serait pas pratique en raison de sa petitesse, on lui substitue une unité secondaire, l'*atmosphère*, qui est la pression atmosphérique moyenne faisant équilibre à 76 centimètres de mercure.

L'atmosphère vaut :

$$76 \times 13{,}6 \times 981 = 1.014 \times 10^6 \text{ (C. G. S.)},$$

c'est-à-dire qu'elle est un peu supérieure à une mégadyne par centimètre carré.

Dans l'industrie, on évalue la pression en kilogrammes par centimètre carré, dont l'unité vaut 981.000 C. G. S. c'est-à-dire à 0,002 près l'atmosphère C. G. S. ou une mégadyne par centimètre carré.

Manomètres métalliques. — Les manomètres métalliques, qui sont les véritables appareils industriels mesurant les pressions, se rapportent au type imaginé par Bourdon.

Le manomètre Bourdon (*fig.* 41) est essentiellement constitué par un tube métallique à paroi mince et flexible contourné à la façon d'une hélice de la longueur d'une spire et demie. Une des extrémités de ce tube est fermée; elle est soudée à une aiguille pouvant se déplacer sur un cadran gradué. L'autre extrémité est fixe et peut être mise en communication avec une chaudière à vapeur, par exemple. Un robinet permet d'empêcher l'arrivée de la vapeur.

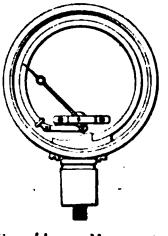

Fig. 41. — Manomètre de Bourdon.

La section du tube est une ellipse dont les axes respectifs sont de 11 et de 4 millimètres.

Pour se servir de cet appareil mis en place, on ouvre le robinet. La pression de la vapeur oblige le tube à se dérouler, ce qui se traduit par un déplacement de l'aiguille sur le cadran. Une simple lecture du cadran donne immédiatement la pression en kilogrammes. L'étalonnage de ce manomètre se fait par comparaison avec un manomètre à mercure.

Cet instrument se déforme plus ou moins selon la modification dans l'état moléculaire du métal. Malgré cet inconvé-

nient, son emploi est général. On remédie d'ailleurs à ce défaut en réglant de temps à autre cet instrument.

Détermination des densités. — La *densité absolue* ou *masse spécifique* d'un corps est la masse du centimètre cube de ce corps (système C. G. S.).

Le *poids spécifique* absolu d'un corps est le poids du centimètre cube de ce corps.

La *densité relative* d'un corps est le rapport des masses de volumes égaux d'un corps et d'une substance choisie comme type. Cette substance-type est, pour les solides et les liquides, l'eau distillée prise à 4° C. Pour les gaz, cette substance est l'air à 0° et à la pression de 760 millimètres de mercure.

La formule donnant la densité relative d'un corps est :

$$D = \frac{Vd}{Vd_0} = \frac{d}{d_0},$$

V étant le même volume de ces deux corps, d et d_0 leurs masses spécifiques.

Les formules générales d'application courante sont :

$$M = Vd \qquad \text{et} \qquad P = Vdg,$$

M étant la masse, P le poids, V le volume, d la masse spécifique du corps solide ou liquide, g l'accélération, le tout exprimé en unités C. G. S.

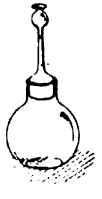

Fig. 42. — Procédé du flacon.

Densité des solides. — *Procédé du flacon.* — On prend un flacon à large goulot usé à l'émeri, sur lequel on met un bouchon creux en verre surmonté d'un tube capillaire élargi à sa partie supérieure (*fig.* 42). Un point de repère est tracé sur la partie étroite du tube.

Pour déterminer la densité d'un solide, on procède aux opérations suivantes :

1° On remplit le flacon jusqu'au repère avec de l'eau. On le met sur le plateau d'une balance avec le corps à peser. On fait la tare sur l'autre plateau jusqu'à parfait équilibre.

2° On remplace le corps par des poids marqués M et on rétablit l'équilibre.

3° Puis on débouche le flacon, on y fait tomber le corps solide et, après avoir ramené le liquide au niveau du repère, on ajoute des poids M′ sur le plateau pour rétablir l'équilibre rompu.

Le rapport $\frac{M}{M'}$ représente la masse d'un volume d'eau égal à celui du corps, c'est-à-dire la densité du corps solide.

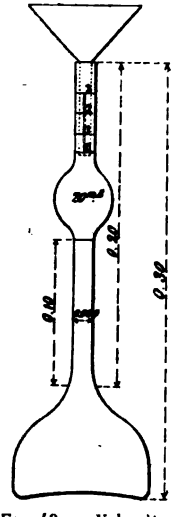

Fig. 43. — Volumètre Le Chatelier et Candlot.

Cette détermination, d'apparence si simple, demande quelques précautions. Des bulles d'air sont souvent adhérentes aux particules du corps solide ou aux parois du vase. Si cet air n'était pas expulsé, on aurait un résultat erroné ; aussi doit-on avoir soin, au préalable, de faire bouillir l'eau qui sert à l'expérience. Pour une détermination plus précise, on place le vase contenant le corps et l'eau sous la cloche d'une machine pneumatique, puis on fait le vide. De cette façon les bulles d'air se dégagent en totalité.

Si le corps à expérimenter est soluble dans l'eau, il faut employer un autre liquide dans lequel il est insoluble. On opère de la même façon que précédemment. Connaissant la densité de ce liquide, on aura la densité réelle en multipliant entre eux les deux résultats trouvés. Pour les chaux et ciments, on évite l'action de l'eau en se servant de la benzine ou de l'essence minérale.

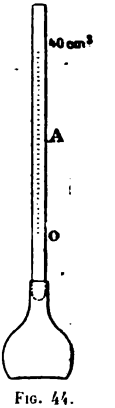

Fig. 44. Volumètre Schumann.

Les appareils employés sont connus sous le nom de volumètres. Parmi eux, le volumètre de MM. Le Chatelier et Candlot (*fig.* 43) se distingue par sa simplicité et sa facilité de maniement. Le volumètre de Schumann est destiné au même usage (*fig.* 44).

La *densité apparente* d'une substance est simplement le poids d'un litre de cette substance. Pour éviter d'avoir des

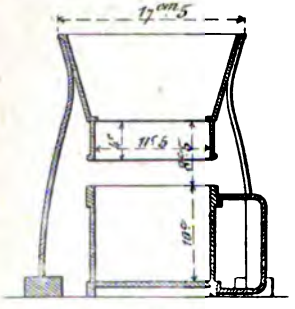

Fig. 45. — Tamis Viallet.

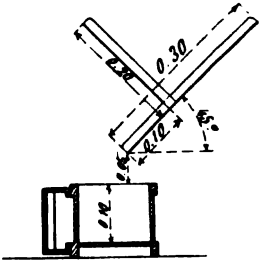

Fig. 46. — Plan incliné.

résultats divergents provenant du tassement irrégulier de la substance que l'on verse dans un récipient de la contenance du litre, on a été conduit à adopter des dispositifs spéciaux qui provoquent un écoulement régulier et un tassement uniforme. Pour les chaux et ciments en poudre, on emploie l'un des appareils suivants : tamis Viallet (*fig.* 45), plan incliné (*fig.* 46), entonnoir normal (*fig.* 47), appareil Tetmajer, entonnoir à tamis (*fig.* 48).

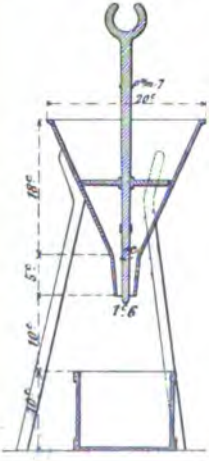

Fig. 47.
Entonnoir normal allemand.

Quand une poudre est composée d'éléments de densités différentes et très voisines, comme un mélange de ciment de laitier et de ciment portland, on se sert d'une liqueur de densité intermédiaire (2,93) obtenue par l'addition en proportion convenable de benzine à un liquide lourd comme l'iodure de méthylène. La densité maxima de la solution d'iodure de méthylène est de 3,34. D'autres produits remplissent le même office. Tels sont : le borotungstate de cadmium

(liqueur de Klein : $d = 3{,}28$), l'iodure double de mercure et de potassium (liqueur de Thoulet).

On verse l'une des liqueurs précédentes dans un tube à essai bouché à l'émeri, muni d'un robinet à sa partie inférieure. On laisse tomber une portion du corps solide. Les particules surnagent. On étend alors la liqueur avec un liquide approprié (benzine, alcool, éther, etc.). On agite ; on verse à nouveau et on s'arrête lorsque, après agitation, les

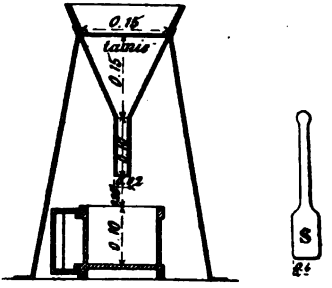

Fig. 48. — Entonnoir à tamis.

particules solides flottent au sein du liquide. On ouvre alors le robinet, on recueille une portion du liquide dont on détermine la densité au moyen de la méthode du flacon. Cette densité est précisément celle du corps solide essayé.

Enfin, dans quelques cas particuliers, des appareils spéciaux comme celui de M. Thoulet, basé sur l'entraînement de corps finement divisés par la vitesse convenablement réglée d'un courant d'eau, peuvent permettre une séparation des substances par ordre de densité.

Procédé de la balance hydrostatique. — Ce procédé consiste à suspendre le corps à l'un des plateaux de la balance au moyen d'un fil fin. On équilibre le système avec une tare que l'on place sur l'autre plateau. On retire ensuite le corps que l'on remplace par des poids marqués ; soit P ce poids total.

On enlève les poids, que l'on remplace à nouveau par le corps, que l'on plonge, cette fois, dans un vase contenant de l'eau. On rétablit l'équilibre rompu en ajoutant un poids P'.

Comme précédemment, le rapport $\frac{P}{P'}$ donne la densité absolue ou le poids spécifique.

La balance hydrostatique est surtout employée pour déterminer la densité des métaux. Cette mesure présente un grand intérêt, car elle peut faire connaître la pureté d'un métal, la présence ou l'absence de matières étrangères, de soufflures, etc.

Densité des liquides. — On peut déterminer la densité d'un liquide en se servant d'un flacon que l'on pèse successivement vide, puis plein du liquide.

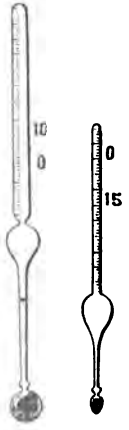

Fig. 49. Aréomètre.

Pratiquement, on détermine la densité des liquides au moyen d'*aréomètres*. Ce sont des flotteurs en verre composés d'une tige portant des divisions (*fig.* 49). A la base de cette tige se trouve soudée une partie sphérique ou cylindrique lestée avec du mercure. On plonge cet instrument dans le liquide et on lit directement la densité au point d'affleurement de la tige.

On construit des aréomètres ou densimètres pour divers usages. On leur donne le nom de pèse-acide, pèse-esprit, pèse-lait, alcoomètre, etc.

En physique comme en chimie, ces instruments sont très employés.

LOIS DE L'HYDROSTATIQUE

Liquides soumis à l'action de la pesanteur. — THÉORÈME FONDAMENTAL. — La différence des pressions moyennes par unité de surface pour deux parois planes est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base l'unité de surface, et pour hauteur la différence de niveau des centres de gravité des deux parois planes.

Liquides superposés. — 1° Quand un vase contient deux liquides non miscibles et de densités différentes, ces liquides *se superposent par ordre de densités, le plus dense au fond, et la surface de séparation est horizontale ;*

2° Quand deux liquides superposés sont dans des vases différents, les hauteurs h et h' des liquides au-dessus de la surface de séparation sont *inversement proportionnelles aux densités d et d'* des deux liquides (les surfaces libres étant soumises à la même pression). On a donc :

$$\frac{h}{h'} = \frac{d'}{d}.$$

Principe d'Archimède. — Les pressions exercées par un liquide sur les parois d'un corps solide plongé dans le liquide ont une résultante égale et directement opposée au poids du liquide déplacé par le corps solide.

Équilibre des corps flottants. — Pour que l'équilibre d'un corps plongé dans un liquide ait lieu, il faut que :

1° La poussée égale le poids du corps ;

2° Le centre de gravité du corps et le centre de poussée soient sur une même verticale.

Capillarité. — Loi de Jurin. — Pour un même liquide, *les hauteurs soulevées dans des tubes capillaires sont en raison inverse des diamètres des tubes.*

Les dépressions capillaires suivent une loi semblable.

PNEUMATIQUE

Compressibilité des gaz. — Loi de Mariotte. — A une même température, les volumes occupés par une même masse gazeuse sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte.

Ou encore : A une même température, les densités d'un gaz sont proportionnelles aux pressions que ce gaz supporte.

Si v et v' sont les volumes d'une même masse de gaz à une même température et aux pressions p et p', on a :

$$vp = v'p'. \qquad \text{(premier énoncé)}$$

Or, comme on a :

$$\rho v = \rho' v',$$

on déduit :

$$\frac{\rho}{p} = \frac{\rho'}{p'}, \qquad \text{(deuxième énoncé)}$$

ρ et ρ' étant les densités du gaz à la température considérée sous les pressions p et p'.

La loi de Mariotte doit être considérée comme une loi approchée.

Mélange des gaz. — La pression exercée par un mélange de gaz est égale à la somme des pressions qu'exerceraient respectivement les divers gaz si chacun d'eux occupait seul le volume entier du mélange.

Ce que l'on peut traduire par l'équation :

$$P = p\frac{v}{V} + p'\frac{v'}{V} + p''\frac{v''}{V} + \ldots = \sum\frac{pv}{V}.$$

dans laquelle v, v', v'', ..., sont les volumes de gaz ayant des pressions respectives p, p', p'', ..., le mélange de ces gaz occupant un volume V.

Solubilité des gaz. — Première loi. — Les quantités d'un gaz dissoutes par l'unité de volume d'un liquide sont proportionnelles à la pression que ce gaz exerce sur la surface du liquide.

Deuxième loi. — Lorsqu'un mélange de plusieurs gaz est en contact avec un liquide, chacun d'eux se dissout avec son coefficient de solubilité propre et proportionnellement à la pression qui doit lui être attribuée dans le mélange.

CHAPITRE X

CHALEUR

Thermométrie. — Les analyses et les essais de matériaux nécessitent l'usage fréquent du thermomètre. Un thermomètre de précision n'est pas souvent nécessaire dans ce genre d'opérations. Par contre, un bon thermomètre à mercure est indispensable. La construction de cet instrument est trop connue pour qu'il soit besoin de la rappeler.

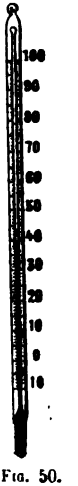

FIG. 50.
Thermomètre.

Les trois échelles thermométriques sont : l'échelle centigrade, l'échelle Réaumur et l'échelle Fahrenheit.

L'échelle centigrade (*fig.* 50) est, en France, l'échelle couramment employée. Son zéro correspond à la température de fusion de la glace; le degré 100 correspond à la température d'ébullition de l'eau sous la pression de 760 millimètres. L'intervalle entre ces deux points fixes est partagé en 100 parties dont chacune représente, par conséquent, 1 degré centigrade.

L'échelle Réaumur a les mêmes points fixes, mais leur intervalle est divisé en 80 parties seulement. 1 degré R. équivaut donc à $\frac{5}{4}$ du degré C.

L'échelle Fahrenheit est adoptée en Hollande, en Angleterre et dans l'Amérique septentrionale; son point fixe supérieur (100°) est établi à la température de l'ébullition de l'eau, et son point fixe inférieur (0°) à la température obtenue par un mélange à poids égaux de sel ammoniac (chlorure d'ammonium) et d'eau. L'intervalle est partagé en 212 divisions

égales. 1 degré C. vaut $\frac{9}{5}$ du degré F. Le 0 degré C. correspond au 32e degré F.

Dilatation des solides. — Il y a trois sortes de dilatations : les dilatations linéaire, superficielle et cubique.

La *dilatation linéaire* d'un corps entre 0° et $t°$ est l'allongement Λ_t que subit l'unité de longueur d'un corps dont la température varie de 0 à $t°$.

La *dilatation cubique* d'un corps entre 0 et $t°$ est l'accroissement K_t que subit l'unité de volume du corps quand sa température varie de 0 à $t°$.

La *dilatation superficielle* d'un corps est celle qui correspond à l'unité de surface.

Les coefficients des dilatations linéaire et cubique d'un corps λ et k sont les allongements qu'éprouvent les unités de longueur et de volume à 0° quand la température du corps augmente de 1°.

Le coefficient de dilatation cubique k est le triple du coefficient de dilatation linéaire.

La chaleur dilate les corps solides dans des proportions parfois considérables, de même qu'un refroidissement amène une contraction du même genre. On sait, par exemple, qu'une barre de fer ayant une longueur de 1 mètre et une section de 1 centimètre carré développe en se refroidissant de 100 à 0° un effort capable de soulever un poids de 2.600 kilogrammes. On conçoit de suite l'importance qu'il faut attribuer à ces phénomènes lorsqu'on doit étudier un projet de construction métallique. Des déformations importantes pourraient amener la rupture ultérieure de pièces et d'une partie de l'ouvrage.

La dilatation des matériaux d'agrégation est de beaucoup inférieure à celle des métaux.

Calorimétrie. — La calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0 à 1° la température de 1 kilogramme d'eau (grande calorie ou calorie-kilogramme-degré) ou de 1 gramme d'eau (petite calorie ou calorie-gramme-degré). Cette dernière quantité est celle qui correspond à l'unité de

chaleur dans le système C. G. S. On la nomme aussi *millicalorie* ou *therm*.

La chaleur spécifique d'un corps est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0 à 1° la température de l'unité de masse de ce corps.

La chaleur spécifique des substances se détermine au moyen de calorimètres.

L'application industrielle du calorimètre de M. Berthelot a été faite par MM. Mahler et Hempel, qui ont imaginé l'obus ou bombe calorimétrique. Cet appareil sert surtout à rechercher la puissance ou le pouvoir calorifique des combustibles, c'est-à-dire le nombre de calories que dégage 1 gramme de combustible en brûlant dans un excès d'oxygène.

L'obus de M. Mahler est décrit dans la deuxième partie de cet ouvrage à propos des essais de charbons (chap. XVIII).

Conductibilité. — La conductibilité est la propriété que possèdent les corps de propager la chaleur de proche en proche dans l'intérieur de leur masse.

On reconnaît expérimentalement que les métaux sont bons conducteurs de la chaleur. L'argent est le meilleur conducteur de tous les corps. Viennent ensuite le cuivre, le laiton, le zinc, le fer, le plomb. Le verre, la porcelaine, le bois et les matériaux de maçonnerie sont plutôt mauvais conducteurs.

Les coefficients de conductibilité calorifique déterminés par Wiedemann et Franz sont les suivants :

Argent	1.000
Cuivre	736
Or	532
Etain	145
Fer	119
Acier	116
Plomb	85
Platine	84

Problème du mur. — Soit un mur homogène et indéfini (*fig.* 51) dont les faces sont maintenues à des températures constantes T et T'. La chaleur traverse le mur de la paroi chaude à la paroi froide jusqu'au moment où un *régime permanent*

sera établi. A partir de cet instant, la température θ dans un plan P parallèle aux faces du mur est invariable, mais elle décroît d'une façon régulière depuis la face la plus chaude jusqu'à la face la plus froide. Pendant le régime permanent, une section S est traversée par une même quantité de chaleur Q pendant un temps donné x.

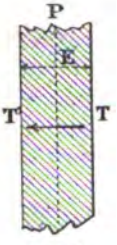

Fig. 51. Problème du mur.

En désignant par E l'épaisseur de ce mur, la quantité de chaleur Q traversant la surface S parallèle aux faces est donnée par la formule

$$\frac{Q}{x} = \frac{cS\,(T - T')}{E},$$

c étant le coefficient de conductibilité calorifique de la substance constituant le mur, c'est-à-dire la quantité de chaleur qui traverse, pendant l'unité de temps, l'unité de surface d'une tranche prise sur un mur de 1 mètre d'épaisseur dont les faces parallèles extrêmes sont à des températures différant de 1°.

Pyromètre à radiations calorifiques. — Le pyromètre imaginé par M. Féry met à profit les radiations calorifiques dégagées par un corps pour la mesure de la température de ce corps. La description et les dessins de ce pyromètre sont donnés dans une notice de M. Pellin de laquelle sont extraites les lignes suivantes :

« Les lois du rayonnement calorifique sont aujourd'hui bien connues; en 1882, *Stéfan* a formulé la loi qui porte son nom et qui donne la relation sur l'intensité du rayonnement et la température du four : *La quantité de chaleur rayonnée par un four ou par un corps noir*[1] *est proportionnelle à la*

1. Cette loi n'est rigoureuse que pour un four ne présentant qu'une petite ouverture par rapport à son volume (enceinte isotherme), ou pour les corps dits noirs : oxydes de fer, de cuivre, de chrome, charbon, etc... Elle est en défaut pour les métaux polis, les oxydes blancs : chaux, magnésie, manchon à incandescence, etc.

Cependant, si ces corps, qui ont un pouvoir émissif plus petit que l'*enceinte isotherme* ou le charbon, dont le pouvoir émissif est

quatrième puissance de la température absolue du corps rayonnant.

On a démontré, depuis, l'exactitude théorique de la relation de *Stéfan*, $Q = aT^4$, en se basant sur des considérations thermodynamiques.

L'emploi de cette méthode indirecte de mesure des températures a l'avantage de soustraire le couple à l'action destructive des gaz chauds, elle permet de mesurer des températures extrêmement élevées : arc électrique par exemple ; points d'ébullition des métaux [1].

Lunette pyrométrique. — Le premier appareil réalisé sur ces données se présente sous la forme d'une lunette qui per-

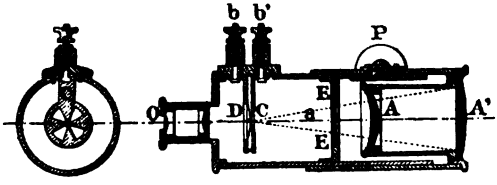

FIG. 52. — Lunette pyrométrique de Féry.

met de viser le corps chaud. Pour augmenter l'ouverture de l'objectif sans trop en augmenter les aberrations, on a constitué l'objectif par deux lentilles (*fig.* 52), montées dans le même tube commandé par le pignon P pour la mise au point.

pris pour unité, sont placés dans un four, ils suivent la loi de Stéfan.

Dans une enceinte isotherme, tous les corps prennent la même couleur, leur rayonnement devient analogue à celui du charbon ; mais, si on les retire brusquement, chacun reprend son pouvoir émissif propre : la magnésie, par exemple, paraîtra blanche par rapport au charbon.

Détermination des points d'ébullition du cuivre et du zinc (*Annales de Physique et Chimie*, mars 1903).

Enfin, il est à remarquer que le couple thermo-électrique, n'utilisant qu'une partie très faible de la chaleur du four, ne s'altère pas et n'a jamais besoin d'être remplacé.

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (avril 1902) : *La mesure des températures élevées et la loi de* Stéfan.

Le couple thermo-électrique, constitué par deux fils fins tendus sur les supports D et C, est réuni aux bornes *b* et *b'*, permettant de le relier à un galvanomètre.

Devant les fils du couple est disposé un écran métallique en forme de croix, visible en C (coupe perpendiculaire à l'axe de la lunette) ; cet écran ne laisse à découvert que la soudure du couple.

On comprend facilement qu'à partir du moment où cette soudure est couverte par l'image de l'ouverture percée dans la paroi du four, les indications deviennent indépendantes de cette ouverture.

On doit donc, dans l'emploi de l'appareil, employer une ouverture suffisante pour qu'à 1 mètre, distance minima à laquelle la visée est commode, l'image de l'ouverture déborde franchement le petit disque central de la croix, qui constitue la soudure chaude du couple.

Pour réaliser ces conditions, l'ouverture doit être au moins de 3 centimètres de diamètre, une ouverture plus grande permettrait évidemment de se placer plus loin. Si, par exemple, la porte d'un four a 60 centimètres dans sa plus petite dimension, on peut se placer à 20 mètres, car, à cette distance, cette porte est vue sous le même angle que 3 centimètres à 1 mètre.

En se reculant ainsi du four, il faut raccourcir le tirage de la lunette, pour que la mise au point reste correcte. Pour éviter que cette variation de tirage de l'instrument ne change les indications, on a disposé à une distance fixe du couple un diaphragme E qui ne permet jamais à l'objectif de travailler à pleine ouverture ; il en résulte que le cône des rayons calorifiques qui tombe sur la soudure ayant au sommet un angle constant, les indications sont indépendantes de la distance, pourvu que l'image soit plus grande que le centre de la croix formant le réticule de la lunette.

Emploi de la lunette pyrométrique. — Le galvanomètre G (*fig.* 53) étant relié à la lunette par les deux cordons souples de manière à ce que les bornes noires soient réunies par un cordon de même couleur, on obtient l'horizontalité par les vis calantes en s'aidant du niveau que porte l'appareil.

La suspension C du galvanomètre porte deux boutons mo-

letés, le bouton supérieur fait monter ou descendre l'aiguille du galvanomètre. Le second bouton, plus large que le premier, permet de ramener l'aiguille au zéro si elle n'y est pas ; d'ailleurs une erreur de 1 millimètre dans le zéro ne donne que des erreurs de quelques degrés dans la lecture.

On oriente ensuite la lunette vers le four et on met au point la croix qui forme le couple, au moyen du tirage de l'oculaire O ; puis le pignon P permet de rendre bien nette

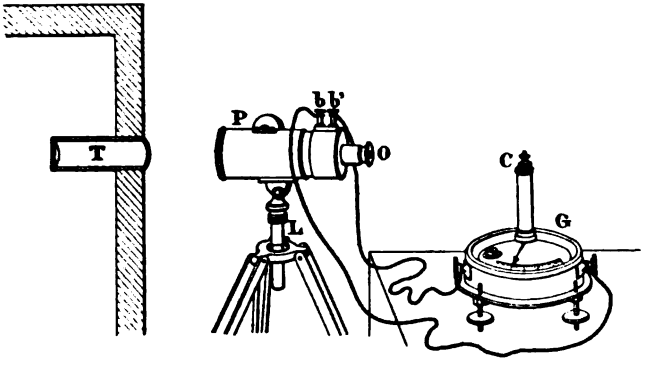

Fig. 53. — Galvanomètre de cette lunette.

l'image du four. On s'assure que la mise au point est rigoureuse en déplaçant légèrement la tête à droite et à gauche, l'image du four ne doit pas se déplacer par rapport à la croix ; on peut, par la manœuvre du pignon, obtenir que ceci ait lieu rigoureusement. Il n'y a plus alors qu'à lire sur le cadran divisé en rouge la température indiquée par l'aiguille.

Le type courant de lunette fonctionne de 800 à 16 ou 1.700° ; on étalonne l'appareil pour des températures plus élevées si on le désire ; mais, dans ce cas, la graduation partira de plus haut : ainsi par exemple une lunette étalonnée jusqu'à 2.500° a une échelle commençant à 1.200°.

Télescope pyrométrique. — L'appareil précédent, employé en verrerie, céramique, métallurgie (four Martin), n'a pas été

trouvé assez sensible pour certaines opérations telles que la trempe, le recuit, la cémentation des aciers, etc.

Pour obtenir la sensibilité désirée, on a remplacé l'objectif de la lunette, qui présente une grande absorption au-dessous de 800°, par un miroir concave, et l'appareil a pris la forme d'un télescope. L'appareil présente la même indé-

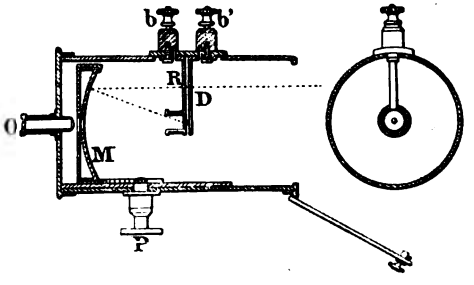

Fig. 54. — Télescope pyrométrique.

pendance que la lunette en ce qui concerne la distance et les dimensions du foyer.

Devant le réticule thermo-électrique R (*fig.* 54) qui occupe le fond d'un tube, est installé un système de deux miroirs percé au centre d'un trou pour laisser libre la soudure du couple ; c'est par cette petite ouverture que les rayons concentrés par le miroir concave M tombent sur le couple. Deux miroirs servent, en outre, à la mise au point ; ils sont disposés de telle manière que l'image du four semble coupée en deux parties qui ne coïncident pas lorsque cette mise au point n'est pas correcte.

La figure 55 montre l'aspect observé dans l'instrument pour diverses mises au point.

La distance minima de visée est de 1 mètre, et l'ouverture du four doit être à cette distance de 7 centimètres.

La sensibilité de cet appareil est environ 10 fois plus grande que celle de la lunette, il est gradué de 500 à 1.100°.

Emploi du télescope pyrométrique. — Le réglage du galvanomètre est le même que dans le cas précédent. L'image du

four étant plus grande que le petit trou noir occupant le centre du champ, on manœuvre le pignon P jusqu'à ce que l'image semble unique (*fig.* 55 : exacte); il suffit ensuite de lire la déviation sur l'échelle du cadran divisée en bleu. Un même galvanomètre portant une division rouge et l'autre bleue peut servir pour les deux instruments. Cet ensemble

FIG. 55. — Positions des images (du télescope).

permet donc de mesurer toutes les températures entre 500 et 1.700°. »

LOIS DE LA CHALEUR

Dilatation des gaz. — LOIS DE GAY-LUSSAC. — PREMIÈRE LOI. — Les gaz et les vapeurs exposés à des températures égales se dilatent exactement de la même quantité.

DEUXIÈME LOI. — Le coefficient de dilatation des gaz entre 0° et 100° est $\alpha = 0{,}00375$, la pression étant supposée constante.

TROISIÈME LOI. — La dilatation des gaz est indépendante de la pression.

Expériences de Regnault. — A la suite d'expériences précises, Regnault a trouvé :

0,003665 pour la valeur moyenne des coefficients de dilatation des gaz entre 0° et 100°, sous volume constant;

0,00367 pour la valeur moyenne des coefficients de dilatation entre 0° et 100° sous pression constante;

Que α_v et α_p augmentent avec la pression, et que α_p est plus grand que α_v, sauf pour l'hydrogène.

La conclusion de ces expériences est donc que les lois de Gay-Lussac sont inexactes. Toutefois, comme elles sont suf-

fisamment approchées, on les applique dans la plupart des cas pratiques, et on emploie pour tous les gaz la relation qui en est l'expression :

$$\frac{pv}{1+\alpha t} = C^{te},$$

dans laquelle on donne à α la valeur 0,00367, ou $\frac{1}{273}$ ou $\frac{11}{3.000}$.

Mélange des gaz et des vapeurs. — Loi de Dalton. — Dans un espace fermé contenant un gaz, la force élastique maxima de la vapeur émise par un liquide est la même que dans le vide à la même température.

On peut encore exprimer cette loi sous la forme suivante : la force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la somme des forces élastiques qu'ils auraient isolément dans le même espace.

Changements d'état des corps. — Lois de la fusion. — 1° Chaque substance solide fond, sous pression constante, à une température constante : c'est le point de fusion de la substance;

2° Si la pression ne varie pas, la température reste constante pendant toute la durée de la fusion;

3° La fusion est accompagnée, en général, d'un accroissement de volume.

Lois de la solidification. — 1° La solidification d'un corps a lieu à une température fixe qui est aussi celle de la fusion;

2° La température du mélange solide et liquide reste invariable pendant toute la durée de la solidification.

Lois de l'ébullition. — 1° Un liquide entre toujours en ébullition à la même température (point d'ébullition), la pression extérieure étant constante;

2° La température du liquide reste invariable pendant toute la durée de l'ébullition;

3° Un changement de volume très grand accompagne toujours ce changement d'état.

Calorimétrie. — Loi de Dulong et Petit. — Le produit de la chaleur spécifique d'un corps par son poids atomique est un nombre constant.

Chaleur rayonnante. — Lorsqu'un rayon calorifique tombe sur une surface polie :

1° Le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence ;

2° L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

Réfraction. — 1° Le rayon calorifique réfracté reste dans le même plan d'incidence.

2° Le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction est constant pour un même milieu.

Équivalent mécanique de la chaleur. — Principe de l'équivalence. — *A un travail déterminé correspond toujours la même quantité de chaleur dégagée, quel que soit le procédé employé pour transformer le travail en chaleur.*

Il y a, en effet, un rapport constant entre le travail dépensé, exprimé en kilogrammètres, et la chaleur produite, exprimée en calories; ce rapport constant J est l'*équivalent mécanique de la chaleur.*

CHAPITRE XI

OPTIQUE

Lentilles. — Les lentilles qui entrent dans la composition des instruments d'optique se rapportent à six types différents : lentilles biconvexe, plan-convexe, concave-convexe (ménisque convergent), biconcave, plan-concave et convexe-concave (ménisque divergent) (*fig.* 56).

La loupe, ou microscope simple, est une lentille convergente à court foyer qui donne l'image virtuelle et amplifiée d'un objet. La distance focale des loupes ordinaires est comprise entre 5 millimètres et 5 centimètres.

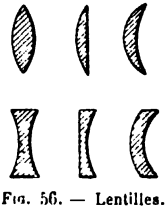

Fig. 56. — Lentilles.

Le grossissement linéaire ou en diamètres G est le rapport des diamètres apparents de l'image formée et de l'objet lui-même.

Le grossissement superficiel est égal au carré du grossissement linéaire.

Le grossissement se mesure directement à l'aide d'un micromètre et d'une chambre claire.

Microscope. — Le microscope composé est essentiellement formé de deux verres convergents. L'un est à court foyer, c'est l'objectif ; il est tourné vers l'objet. Le second, moins convergent, est l'oculaire ; il est tourné vers l'œil de l'observateur. Ces verres sont montés dans un tube ; leurs axes optiques coïncident.

Dans un microscope, un objet AB (*fig.* 57) situé au delà, mais

très près du foyer principal f', produit en ba une image réelle, renversée et agrandie.

Cette image se forme à une distance assez éloignée du deuxième foyer principal f. On fait varier la distance de l'objectif Y à l'objet AB de façon que l'image ab soit placée entre l'oculaire Z et son foyer f_1. L'oculaire joue ainsi le

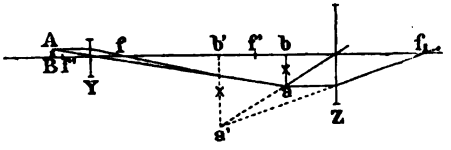

Fig. 57. — Marche des rayons dans le microscope.

rôle d'une loupe et donne à la place de l'image ab une autre image $a'b'$, virtuelle, agrandie et également renversée par rapport à la position de l'objet.

La mise au point s'effectue en faisant varier l'oculaire à la manière d'une loupe jusqu'à ce que l'image $a'b'$ s'observe à la distance minima de la vision distincte. On peut aussi rapprocher l'objectif de l'objet en conservant constante la distance de l'objectif et de l'oculaire.

Dans un microscope composé, la puissance du microscope est le produit de la puissance de son oculaire par le grossissement linéaire de son objectif :

$$P = p\gamma.$$

Il existe de nombreux modèles de microscopes. Parmi les microscopes de précision, il faut citer celui de Nachet. D'autres microscopes sont disposés pour un usage spécial ; tel est celui de M. Le Chatelier, dont la description sera donnée au sujet de la métallographie microscopique des aciers.

Pyromètre à radiations lumineuses. — On se sert quelquefois des radiations lumineuses pour déterminer les températures à l'aide de pyromètres spéciaux. Ces pyromètres

sont basés sur les lois de Kirschoff, qui a démontré que si, dans une enceinte à température uniforme, on perce une petite ouverture permettant de regarder l'intérieur de cette enceinte, l'intensité de chaque radiation ne dépend que de la température et est indépendante de la nature du corps.

Parmi les pyromètres à radiations lumineuses, on mentionnera ceux de MM. H. Le Chatelier, Crova, et la lunette Mesuré et Nouël.

LOIS DE L'OPTIQUE

Réflexion. — 1° Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale au point d'incidence sont dans un même plan;

2° L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

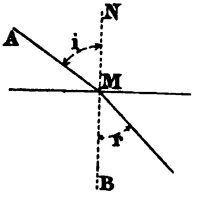

Fig. 58. — Angles d'incidence et de réfraction.

Réfraction. — 1° Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale à la surface de séparation des deux milieux sont dans un même plan;

2° Les sinus des angles d'incidence i et de réfraction r sont dans un rapport constant n qu'on appelle l'indice de réfraction de la lumière (*fig.* 58) :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

CHAPITRE XII

ÉLECTRICITÉ

Un conducteur électrique qui reçoit à chaque extrémité une différence de potentiel devient le siège de phénomènes particuliers qui constituent le courant électrique.

On compare souvent ce flux d'électricité à un courant d'eau et on considère les effets comme étant produits par un flux s'écoulant dans le conducteur dont les extrémités sont placées à une différence de niveau électrique. On adopte un sens conventionnel allant du pôle + au pôle —, le premier pôle étant plus élevé que le second. C'est une façon de rendre plus compréhensible un phénomène abstrait.

Le circuit est l'ensemble du système conducteur dans lequel passe un courant électrique.

Un courant se distingue d'un autre courant par son intensité, sa résistance et sa force électromotrice.

L'intensité I est la grandeur du flux traversant le circuit.

La résistance R est l'obstacle opposé par le circuit au passage du courant.

La force électromotrice E est la cause qui maintient le courant dans le circuit.

L'unité de résistance est l'*ohm international*, basé sur l'ohm égal à 10^9 unités du système électromagnétique C. G. S., qui est la résistance qu'oppose à un courant électrique constant une colonne de mercure à la température de la glace fondante, de 14,4521 grammes-masse, d'une section transversale constante et d'une longueur de $106^{cm},3$.

L'unité de courant est l'*ampère*, égal à 0,1 unité C. G. S. C'est le courant constant qui traverse une solution aqueuse d'azotate d'argent en déposant $0^{gr},001118$ d'argent en 1 seconde.

L'unité de force électromotrice est le *volt*. C'est la force qui, appliquée d'une manière constante à un conducteur dont la résistance est de 1 ohm, produit un courant égal à 1 ampère.

L'unité de quantité est le *coulomb*. C'est la quantité d'électricité transportée par un courant de 1 ampère pendant 1 seconde.

L'unité de capacité est le *farad*. C'est la capacité d'un conducteur chargé au potentiel de 1 volt avec 1 coulomb.

L'unité de travail est le *joule*, égal à 10^7 unités C. G. S. de travail. C'est l'énergie dépensée en 1 seconde par 1 ohm traversé par un courant de 1 ampère.

L'unité de puissance est le *watt*, égal à 10^7 unités C. G. S. de puissance. C'est la puissance de 1 joule par seconde.

Le courant électrique est fréquemment utilisé dans les laboratoires, soit pour la production de la lumière (arc voltaïque, incandescence), soit pour la production de températures élevées (fours électriques), soit pour l'éclairement de certains instruments (microscopes), soit pour la production de forces (moteurs, dynamos, etc.) devant effectuer un travail mécanique déterminé.

Parmi les appareils producteurs d'un courant et ne nécessitant pas le concours d'un secteur électrique, il en est de très simples basés sur les phénomènes thermo-électriques.

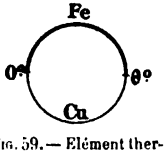

Fig. 59. — Elément thermo-électrique Cu-Fe.

L'élément thermo-électrique (*fig.* 59) comprend un circuit fermé composé de deux métaux différents (cuivre et fer, par exemple) soudés entre eux. Si les deux soudures sont soumises à des températures inégales, mais constantes, il se produit un courant électrique dont la force électromotrice E est donnée par la formule d'Ohm :

$$E = Ir,$$

dans laquelle I est l'intensité du courant, et r la résistance du circuit.

Si le circuit est ouvert au lieu d'être fermé, la différence de potentiel entre les deux extrémités est encore égale à E.

Quand les températures des soudures viennent à changer, E varie selon la loi suivante : soit 0° la température d'une soudure, θ la température variable de l'autre soudure, la première restant fixe. Quand θ s'élève, la force électromotrice E croît, arrive à un maximum, décroît et change de signe. Ces variations sont très sensibles et s'observent facilement quand on relie les deux fils aux bornes d'un galvanomètre. Cette loi se représente en portant en abscisses les valeurs successives de θ et en ordonnées les forces électromotrices correspondantes. Elle se manifeste par une courbe très voisine de la parabole (*fig.* 60).

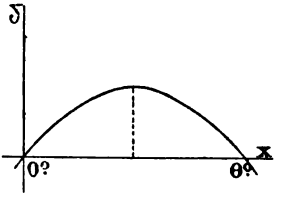

FIG. 60. — Courbe de la force E.

Si deux métaux M et M' sont séparés dans un circuit par un ou plusieurs métaux intermédiaires maintenus à une même température t, la force électromotrice est la même que si les deux métaux étaient en contact direct et que leur soudure fût portée à la température t (loi des métaux intermédiaires).

Pile thermo-électrique. — Lorsque les couples sont formés de gros fils, on a une faible résistance, mais le courant est assez intense. On augmente d'ailleurs l'intensité de ce courant en associant une quantité plus ou moins grande de couples, ce qui constitue une pile. Les soudures paires sont placées d'un même côté et les soudures impaires du côté opposé (*fig.* 61). La force électromotrice totale est égale à la somme des forces électromotrices de tous les couples.

Dans la pile Melloni (*fig.* 62), les barreaux sont en antimoine et en bismuth, repliés de façon à former un parallélipipède dont les soudures analogues sont sur une même face. On se sert surtout de cette pile pour les expériences relatives à la chaleur rayonnante.

La pile Clammond est formée d'un alliage de zinc et d'antimoine. L'ensemble affecte la forme d'un cylindre chauffé intérieurement par un bec de gaz.

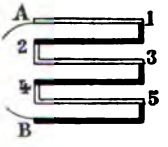

Fig. 61. — Pile thermo-électrique.

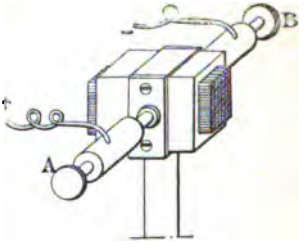

Fig. 62. — Pile Melloni.

Pyromètre H. Le Chatelier. — Le principe du couple thermo-électrique a servi de base à la construction d'un pyromètre imaginé par M. H. Le Chatelier et dont l'usage est devenu pour ainsi dire général dans les établissements industriels.

Le couple thermo-électrique et le galvanomètre, dont l'ensemble constitue le pyromètre, sont décrits ainsi qu'il suit par MM. H. Le Chatelier et Boudouard, dans l'ouvrage intitulé *Mesure des températures élevées*[1] :

Le couple thermo-électrique adopté par M. H. Le Chatelier est le couple platine et platine rhodié à 10 0/0. La jonction des fils est faite par une torsade dont l'extrémité est soudée à la soudure autogène obtenue par la fusion du platine au moyen du chalumeau oxhydrique. Ce point de fusion permet de régler la marche de l'aiguille du galvanomètre et de déterminer le point de l'échelle correspondant à 1.780°.

Les fils du couple sur toute leur longueur sont isolés par des cylindres en terre réfractaire, percés parallèlement dans le sens de la longueur de deux trous de 1 millimètre à travers lesquels on fait passer les fils (*fig.* 63); ces cylindres sont renfermés dans une canne en fer; la soudure dépasse les isolants et la canne en fer qui les soutient de 5 centimètres

1. Voir aussi la notice de M. Pellin.

environ; de petits tubes en porcelaine servent à protéger cette soudure.

L'autre extrémité de la canne en fer porte une poignée en bois sur laquelle se trouvent extérieurement les bornes de prise de courant et intérieurement deux pinces qui limitent la longueur du couple, ainsi que deux poulies sur chacune desquelles est enroulée une longueur supplémentaire de fils du couple, ce qui permet d'en faire sortir une nouvelle quantité en cas d'avarie de la soudure.

Fig. 63. Couple thermo-électrique.

Lorsque le couple thermo-électrique doit être placé à demeure dans un courant d'air chaud, on le dispose de la manière suivante.

La soudure, les fils du couple isolés par une torsade d'amiante sont placés dans un tube en fer A (*fig.* 64) fermé à une de ses extrémités de manière à éviter toute action oxydante ou réductrice; ce tube porte à une distance convenable du côté de l'extrémité ouverte une bague en fer qui est maintenue dans un presse-étoupe qu'on peut fileter extérieurement et fixer sur la tubulure filetée de la conduite d'air chaud.

Les extrémités du couple constituant les pôles sont réunies à deux bornes *b*, *b'* mises en communication avec un câble aux bornes du galvanomètre.

On peut disposer ainsi un certain nombre de couples en divers points d'une conduite d'air chaud et les réunir successivement au moyen d'un commutateur au galvanomètre, pour connaître les températures aux divers points correspondants de la conduite.

Le galvanomètre pyrométrique se compose d'un grand aimant A en acier au tungstène (*fig.* 65), ayant la forme d'un fer à cheval, monté sur un bâti rectangulaire BB' qui est disposé pour être accroché au mur ou posé sur une table; des vis calantes *v*, *v'* assurent la verticalité et l'horizontalité de l'appareil, dont le contrôle est fait par un niveau circulaire *n* fixé sur l'appareil.

La partie supérieure de l'aimant porte un trou lisse dans

lequel se meut un manchon à bouton moleté C, percé en son centre d'un trou fileté, dans lequel tourne la tige d'un deuxième bouton D, qui porte à sa partie inférieure un

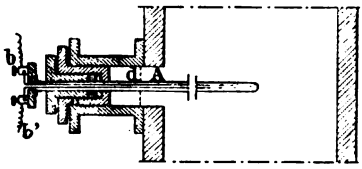

Fig. 64. — Dispositif d'expérience.

crochet auquel est fixé et soudé un long fil de platine *f* de $\frac{1}{10}$ de millimètre laminé méplat à $\frac{2}{100}$ de millimètre ; ce fil, qui est en communication avec la masse et qui cons-

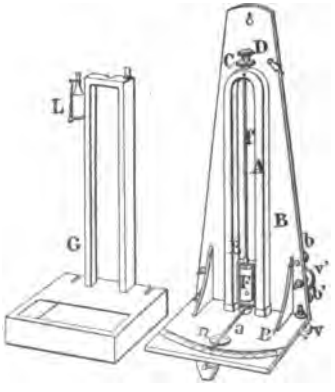

Fig. 65. — Galvanomètre H. Le Chatelier.

titue un pôle, sert de support à un cadre mobile E, constitué par un enroulement de fils de maillechort de $\frac{2}{10}$ de millimètre ; il sert également de conducteur étant réuni à l'une des extrémités de la bobine en fils de maillechort. L'autre extrémité du fil du cadre est reliée à une spirale en platine

de $\frac{1}{20}$ de millimètre, logée dans l'intérieur d'un cylindre en fer doux F pour éviter les variations de température. Ce fer doux, isolé de la masse, est en communication avec une borne également isolée, constituant le second pôle de l'appareil.

L'intervalle qui sépare le cadre mobile des branches de l'aimant, d'une part, et du noyau central de fer doux, de l'autre, est assez grand pour éviter tout frottement accidentel qui s'opposerait au libre mouvement du cadre.

Le cadre tend, sous l'action du courant du couple, à se mettre dans un plan perpendiculaire à celui de l'aimant; la torsion du fil de suspension s'oppose en partie à l'action du courant et ce cadre s'arrête dans une position d'équilibre qui dépend de la force du courant et de la valeur du couple de torsion.

Une aiguille *a* en aluminium, fixée à la partie inférieure du cadre, se meut devant une division de 0 à 180 et peut indiquer la température de 0° à 1.000° ou de 0° à 1.800° pour la course totale de l'échelle, suivant que les fils du couple sont reliés aux bornes 1.2 ou 1.3.

Un cadre à glaces G se place sur le galvanomètre une fois qu'il est réglé, de manière à protéger l'aiguille *a* contre les courants d'air.

Une petite lampe L facilite la lecture des divisions de l'échelle.

Réglage. — Régler l'horizontalité ou la verticalité de l'appareil, selon qu'il est posé sur une table ou accroché à un mur, en agissant sur les vis calantes v, v' de la platine horizontale ou verticale, de manière que la bulle d'air du niveau *n* soit bien centrée.

Rendre l'équipage libre en dévissant le bouton (invisible sur la figure et qui se trouve sous la platine horizontale B'), s'assurer directement de l'absence de frottement du cadre : en donnant une légère secousse à l'appareil, l'aiguille *a* doit prendre et conserver longtemps un léger mouvement d'oscillation dans le sens de sa longueur; des oscillations transversales s'arrêtant rapidement indiquent un frottement du cadre; dans ce cas vérifier à nouveau la position de la bulle d'air du niveau.

Amener l'aiguille au zéro de l'échelle au moyen du bouton C, qui tourne au centre d'un logement pratiqué à la partie supérieure de l'aimant.

Ne pas toucher au bouton D, qui, dans ce mouvement, est entraîné par le bouton C.

La hauteur de l'équipage, et par conséquent de l'aiguille *a*, est réglée par le constructeur de la manière suivante :

On maintient fixe le bouton D (qui porte une tige filetée à l'extrémité de laquelle est fixé le fil de suspension) ; on tourne le bouton C dans un sens ou dans l'autre pour monter ou descendre l'équipage et on s'arrête lorsque l'aiguille qu'il porte à sa partie inférieure est le plus près possible de l'arc divisé, sans toutefois le toucher ; on vérifie, comme il est dit plus haut, l'absence de tout frottement, qui dans ce cas serait produit par l'aiguille trop baissée.

Cette hauteur étant réglée par le constructeur, on ne doit donc toucher au bouton D que lorsqu'on remplace le fil de suspension.

Pour remplacer le fil de suspension, on opère de la manière suivante : on cale l'équipage en vissant le bouton situé sous la platine horizontale B', on descend la tige qui porte le crochet de suspension, en agissant directement sur le bouton D, puis on couche l'appareil, on coupe le fil de suspension à la longueur convenable, on en enroule les deux extrémités sur les crochets de la tige filetée et du cadre E et on fait tomber un grain de soudure d'étain avec un petit fer à souder.

On redresse l'appareil, on décale le cadre, on règle la hauteur de l'aiguille comme il est dit plus haut.

Ce galvanomètre porte trois bornes, ce qui permet d'envoyer dans la bobine du cadre de suspension le courant direct donné par le couple platine et platine rhodié à 10 0/0 en le faisant ou en ne le faisant pas passer dans une bobine de résistance placée derrière la platine verticale B.

Le fil de platine doit toujours être attaché à la borne n° 1 et le fil platine rhodié à la borne n° 2 ou à la borne n° 3, suivant les cas.

L'appareil qui vient d'être décrit a été complété en vue d'en faire un galvanomètre enregistreur. Ce nouvel appareil porte un mouvement d'horlogerie avec échappement à ancre et

un tambour en aluminium recouvert d'un papier pour l'enregistrement (*fig.* 66).

Ce galvanomètre peut aussi fonctionner comme instrument à lecture directe.

Pour étalonner l'un ou l'autre de ces galvanomètres, on se

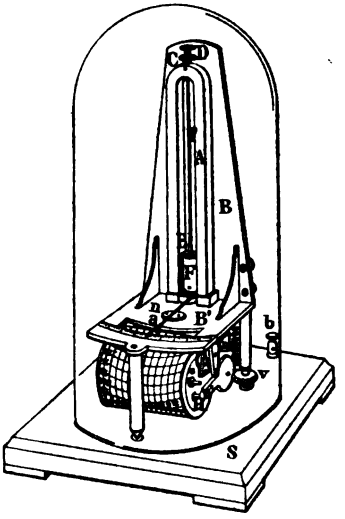

Fig. 66. — Galvanomètre dernier modèle.

sert des points d'ébullition et de fusion des corps suivants et on note pour chacun la déviation de l'aiguille:

Ébullition de l'eau.....	100°	Fusion du chlorure de sodium.....	800°
— de la naphtaline.	218°	Ébullition du zinc.....	930°
Fusion du zinc.....	420°	Fusion de l'or.....	1.035°
Ébullition du soufre.	445°	— du cuivre.....	1.085°
Fusion de l'aluminium...	655°	— du platine.....	1.780°

Sur une feuille de papier quadrillée, on porte en abscisses des longueurs égales représentant les divisions de l'échelle de 0 à 180, et en ordonnées des longueurs égales aux tempé-

ratures des métalloïdes ou métaux observés; on réunit les points obtenus par une courbe qui est sensiblement une droite (*fig.* 67).

La façon de se servir de cet instrument est très simple. La soudure du couple est placée à l'endroit précis dont on veut

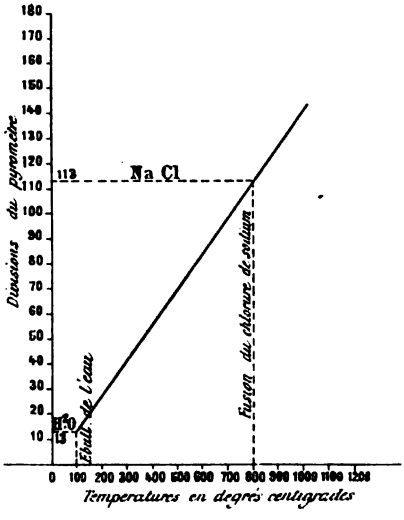

Fig. 67. — Graphique.

avoir la température. L'aiguille du galvanomètre se met aussitôt en mouvement, puis s'arrête à une division de l'arc. On fait la lecture s'il s'agit du premier galvanomètre, on se reporte au graphique et on a immédiatement la température correspondante.

Si l'on change de couple, il faut procéder à un nouvel étalonnage.

Électrolyse. — Quand un courant électrique traverse une solution liquide, celle-ci est généralement décomposée. Le phénomène de décomposition prend le nom d'électrolyse et le liquide celui d'électrolyte.

Si, dans un vase contenant un électrolyte (*fig.* 68), on plonge deux lames conductrices ou électrodes que l'on réunit aux pôles d'une pile, il se produit un courant allant de l'anode ou électrode positive à la cathode ou électrode négative.

La molécule de l'électrolyte se divise en deux parties appelées ions qui se réunissent à la surface des électrodes. On nomme cathion l'ion de la cathode ; c'est de l'hydrogène ou un métal suivant que l'électrolyte est un acide, une base ou un sel. L'anion est l'ion de l'anode.

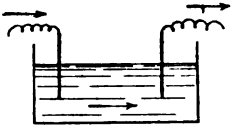

Fig. 68. — Cuve à électrolyse.

Les lois de l'électrolyse sont les suivantes :

Lois qualitatives. — 1° Sous l'action d'un courant, le métal d'un électrolyte se sépare toujours du radical qui lui est uni ;

2° Les produits de cette décomposition n'apparaissent jamais dans la masse même du liquide, mais seulement sur les électrodes.

Le métal se dégage à l'électrode négative et le radical à l'électrode positive.

Lois quantitatives. — Si des voltamètres sont placés les uns à la suite des autres, dans un même courant, on constate que :

1° La masse d'hydrogène recueillie dans chaque voltamètre est la même dans le même temps, quelles que soient la matière et la distance des électrodes, ainsi que la proportion et la nature de l'acide ou de la base ;

2° La quantité de gaz recueillie dans l'intérieur d'un élément est la même que dans les voltamètres extérieurs ;

3° La masse de l'eau décomposée ou de l'hydrogène dégagé dans un temps est proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe dans le voltamètre.

Piles hydro-électriques. — Parmi les nombreux modèles de piles, il en est une qui est d'un emploi fréquent ; c'est la pile Bunsen.

Cette pile (*fig.* 69) se compose des quatre parties suivantes se plaçant l'une dans l'autre : une plaque de charbon, un vase

poreux, un cylindre creux de zinc amalgamé et un vase en grès.

Dans le vase en grès, on verse de l'acide sulfurique au $\frac{1}{10}$ et dans le vase poreux de l'acide azotique ordinaire.

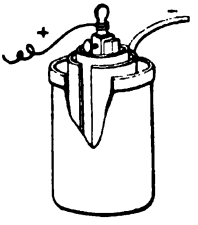

Fig. 69. — Pile Bunsen.

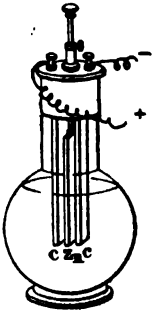

Fig. 70. — Pile au bichromate.

Quand le circuit est ouvert, il n'y a pas de courant, mais dès qu'il est fermé le courant s'établit.

L'inconvénient de ce modèle de pile réside dans le dégagement assez abondant de vapeurs nitreuses, surtout lorsqu'on réunit plusieurs éléments.

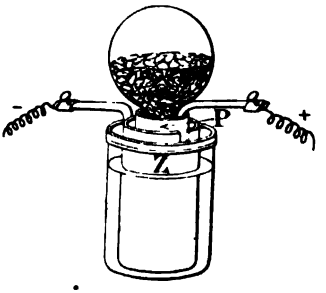

Fig. 71. — Pile Daniell.

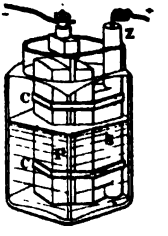

Fig. 72. — Pile Leclanché.

La force électromotrice d'un élément de pile Bunsen est d'environ 1,8 volt.

D'autres modèles de piles peuvent également être employés : pile au bichromate de potassium (*fig.* 70), piles Daniell (*fig.* 71), Callaud, Leclanché (*fig.* 72), etc.

Comme application des piles à des travaux analytiques, on mentionnera l'électrolyse des solutions dans lesquelles on veut effectuer le dosage d'un métal (exemple : analyse d'un cuivre, d'un laiton, d'un bronze).

Galvanomètre. — Ampèremètre. — Voltmètre. — L'intensité des courants se mesure pratiquement à l'aide d'instruments dénommés galvanomètres.

Le galvanomètre ordinaire, appelé aussi *multiplicateur* ou *rhéomètre*, dont le principe est dû à Schweigger, est basé sur la découverte d'Oerstedt relative à l'action que produit le courant magnétique terrestre sur une aiguille aimantée. Un courant qui parcourt un cadre (*fig.* 73), fait d'un fil métallique replié sur lui-même comme le montre la figure, dévie l'aiguille aimantée suivant *ab* d'après la loi d'Ampère.

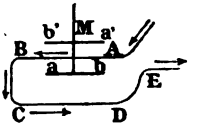

Fig. 73. — Multiplicateur.

L'aiguille supérieure, qui a ses pôles en sens contraire de la première, en vertu de la même loi, prend une position parallèle. C'est le système astatique. En enroulant un grand nombre de fois le fil dans le sens indiqué par les flèches, on multiplie l'action du courant. On comprend dès lors que la position de l'aiguille supérieure, lue sur un cadran gradué placé au-dessous d'elle, donne la mesure de l'intensité du courant (*fig.* 74).

Dans les laboratoires on se sert du galvanomètre ordinaire ou des galvanomètres classiques de Ruhmkorff, Thomson, Deprez-d'Arsonval, etc.

Dans l'industrie, ces instruments ne sont pas pratiques à cause de leur grande sensibilité et de leur fragilité. S'il s'agit de la mesure d'un courant électrique, on se sert d'*ampèremètres*, dont l'un des plus connus est celui de Deprez-Carpentier.

Cet instrument (*fig.* 75) se compose d'une pièce losangée en fer doux supportée par un axe disposé sur pivots au

milieu d'une boîte cylindrique. Cette pièce métallique se trouve placée entre les pôles de deux aimants recourbés. Dans sa position ordinaire, sa direction est parallèle au champ des aimants. L'axe de la bobine est inclinée sur ce champ et le courant tend à ramener l'aiguille dans une direction parallèle aux spires du fil. Jusqu'à 30 ou 40° on admet que la déviation est proportionnelle à l'intensité du courant. Une aiguille est solidaire de l'aimant mobile ; elle se déplace sur un cadran gradué en ampères. Le fil employé dans la cons-

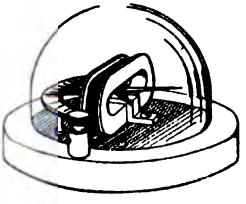

Fig. 74. — Galvanomètre.

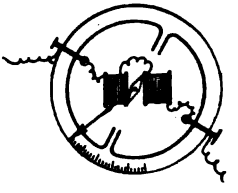

Fig. 75. — Ampèremètre.

truction de cet instrument est gros et court ; par conséquent il offre une très faible résistance au passage du courant.

Le *voltmètre* est un appareil industriel qui est destiné à mesurer la force électromotrice, c'est-à-dire le nombre de volts existant entre deux points d'un circuit. Il affecte la forme extérieure de l'ampèremètre ; mais, au lieu d'un fil gros et court, on emploie un fil long et fin. Le cadran est divisé en volts.

Cet instrument se place en dérivation.

Soit r la résistance d'un circuit ayant une force électromotrice E. L'intensité I du courant qui traversera le galvanomètre sera :

$$I = \frac{E}{g + r},$$

en désignant par g la résistance du galvanomètre.

Si r est très petit par rapport à g, ce qui est le cas ici

puisqu'on a un fil long et fin, on peut le négliger sans erreur sensible dans la formule précédente, qui devient alors :

$$I = \frac{E}{g}.$$

Ainsi les indications données par le voltmètre dépendent seulement de la force électromotrice.

L'aiguille indicatrice de l'instrument donne immédiatement en volts la mesure de cette force.

LOIS DE L'ÉLECTRICITÉ

A. **Électricité statique.** — Loi de Coulomb. — L'action qui s'exerce entre deux petites sphères électrisées varie en raison inverse du carré de leur distance.

Distribution de l'électricité. — Étant donné un conducteur dont les masses électriques sont en équilibre, la résultante des actions de ces charges sur un point intérieur du conducteur est toujours nulle.

La force électrique en un point est la valeur de cette résultante pour une masse d'électricité positive égale à l'unité placée en ce point.

B. **Électricité dynamique.** — Loi du contact ou loi de Volta. — Le contact de deux métaux ou de deux corps homogènes établit entre eux une différence de potentiel ; cette différence ne dépend que de leur nature et de leur température : elle est indépendante de leur forme, de leurs dimensions, de l'étendue des surfaces en contact et de la valeur initiale du potentiel sur chacun d'eux.

Loi des contacts successifs. — Si l'on considère une chaîne de corps métalliques hétérogènes, en contact les uns avec les autres, la différence des potentiels aux extrémités est la même que si les métaux intermédiaires n'existaient pas.

Lois de Kirschoff. — 1° La somme algébrique des intensités des courants qui concourent en un même point est nulle ;

2° Dans un circuit fermé, la somme algébrique des produits de la résistance de chaque conducteur simple par l'intensité du courant qui le parcourt est égale à la force électromotrice qui se trouve dans le circuit, ou est nulle s'il n'y existe pas de force électromotrice.

Loi d'Ohm. — L'intensité I d'un courant (exprimée en ampères) est égale au quotient de la force électromotrice E (en volts) par la résistance R du circuit (en ohms) :

$$I = \frac{E}{R}.$$

Lois de Faraday. — 1° Le travail chimique est le même dans toute l'étendue du circuit extérieur;

2° Le travail intérieur de la pile est égal au travail extérieur;

3° La quantité d'électricité qui dégage un équivalent d'hydrogène met en liberté un équivalent d'un métal quelconque.

C. **Magnétisme.** — Loi de Coulomb. — Les attractions ou répulsions entre les pôles de deux aimants sont en raison inverse du carré de leur distance.

D. **Électro-magnétisme.** — Loi d'Ampère. — Quand un courant rectiligne agit sur un aimant, le pôle nord de l'aimant se porte toujours vers la gauche du courant.

Action d'un courant rectiligne sur un aimant. — Quand un courant rectiligne et indéfini est en présence d'un aimant, chaque pôle de l'aimant est sollicité par une force dont la direction est perpendiculaire au plan qui passe par ce pôle et par le courant. L'intensité de cette force varie en raison inverse de la distance du pôle au courant lui-même.

E. **Électro-dynamique.** — Action des courants sur les courants. — 1° *Courants parallèles.* — Deux courants parallèles et de même sens s'attirent; deux courants parallèles et de sens contraire se repoussent.

2° *Courants croisés.* — Les courants tendent à devenir parallèles et de même sens.

3° *Courants sinueux.* — L'action d'un courant sinueux *ab* (*fig.* 76) est identique à celle d'un courant rectiligne *ac* ayant les mêmes extrémités, pourvu que la distance à laquelle s'exerce cette action soit très grande par rapport à l'amplitude des sinuosités.

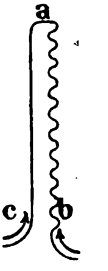

FIG. 76. — Courant sinueux.

F. **Induction.** — LOI DE LENZ. — Quand on déplace un circuit fermé dans le voisinage d'un aimant ou d'un courant, il se développe dans ce circuit un courant de sens contraire à celui qui eût été capable de produire ce déplacement.

DEUXIÈME PARTIE

ANALYSES ET ESSAIS DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

CHAPITRE XIII

PIERRES NATURELLES. — CALCAIRES

Le terme générique de pierres s'applique à la plupart des matériaux de construction faisant partie du règne minéral. Ces matériaux, très répandus dans la nature, se présentent sous des aspects variés. On les classe le plus souvent en deux catégories : les pierres siliceuses et les pierres calcaires. Ces catégories comprennent des variétés nombreuses que tout constructeur doit connaître.

Les pierres siliceuses sont les suivantes : le quartz, le silex, la meulière, le grès, le schiste, le granit, le feldspath, la serpentine, les pierres volcaniques.

Le quartz pur est entièrement formé de silice. Sa densité est de 2,65. Il n'est rayé que par le diamant et les gemmes. Il raye le verre et les minéraux communs; aussi cette propriété se retrouve-t-elle dans les roches où domine ce composé. Il ne fond qu'à une température assez élevée. Il n'est pas attaqué par les acides, sauf par l'acide fluorhydrique. Le quartz hyalin et la calcédoine sont les deux espèces essentielles.

Le quartz constitue un certain nombre de pierres précieuses; il sert à l'ornementation. Avec le jaspe ou quartz brèche, on a édifié les colonnes de l'Opéra, à Paris. On appelle quartzites

des roches de quartz dans lesquelles les grains cristallins sont enrobés de ciment.

Le silex ou pierre à feu existe sous forme de rognons ou de petits bancs disséminés dans le terrain secondaire. Il est fréquemment entouré d'une croûte farineuse. Il contient peu d'eau et une proportion de 1 0/0 de chaux, d'alumine et d'oxyde ferrique. Tantôt il est d'un gris plus ou moins noirâtre comme l'espèce qui se trouve dans la craie, tantôt il est jaune rougeâtre. On s'en sert pour l'empierrement et pour la confection des mortiers. Quand sa grosseur est suffisante, on l'emploie comme moellon dans la maçonnerie ordinaire ou de parement ou encore comme pavé.

La meulière occupe le plus souvent le terrain tertiaire. Lâche, poreuse et résistante, elle adhère très bien au mortier; aussi son usage est-il fréquent dans la construction des ponts, des aqueducs et des égouts. Elle résiste parfaitement aux intempéries et elle supporte de fortes charges sans s'écraser.

Le grès se compose de grains irréguliers de quartz, de feldspath et de mica agglutinés par un ciment. Il est calcarifère, argileux ou glauconieux; l'arkose, la psammite et la mollasse ne sont autre chose que du grès.

Le schiste sera examiné plus loin en raison de son utilisation spéciale (Voir chap. XIV, *Ardoises*).

Le granit renferme du feldspath, du quartz et du mica en proportion variable. Sa teinte provient de la présence d'oxydes métalliques colorés. Cette pierre excessivement dure est pour ainsi dire inaltérable; aussi est-elle utilisée dans la construction d'ouvrages d'art maritimes, tels que jetées, phares, etc. Malgré la difficulté qu'elle présente à la taille, on se sert néanmoins de cette pierre dans les soubassements des édifices importants, ainsi que dans les bordures de trottoirs et dans les pavages.

Le feldspath forme l'élément essentiel du porphyre, qui se compose de cristaux irréguliers parfois assez gros, noyés dans une pâte amorphe plus ou moins vitreuse. Il se trouve aussi dans le kersanton, roche bretonne riche en mica, et dans la variolite, l'euphotide, la diorite et la brèche universelle,

La serpentine est un hydrosilicate de magnésium compact, grenu ou lamellaire, pouvant servir à l'ornementation.

Les roches volcaniques comprennent surtout le trachyte à grain fin et cristallin, à texture poreuse, d'aspect raboteux, de couleur claire, grise ou rougeâtre; le basalte, de teinte noire, bleue ou grise, pierre homogène et tenace, parfois poreuse et magnétique; la lave, poreuse et résistante, facile à tailler, Ces roches sont de bonnes pierres de construction.

Les pierres calcaires se distinguent des pierres siliceuses en ce qu'elles font une vive effervescence au contact des acides. Elles comprennent les marbres et les calcaires ordinaires.

Les marbres sont des calcaires susceptibles de poli. Ils sont formés de carbonate de calcium à peu près pur. S'ils contiennent des matières minérales ou organiques, ils sont diversement colorés. Il y a plusieurs sortes de marbres : les marbres simples, les marbres brèches, les marbres composés, les marbres lumachelles et les albâtres calcaires.

Les calcaires ordinaires forment à eux seuls la catégorie la plus importante des matériaux pierreux entrant dans la construction. On comprend quelquefois dans cette catégorie les chaux sulfatées (gypse), qui fournissent par la cuisson le plâtre ordinaire. On traitera à part le plâtre et on ne considérera ici que les calcaires proprement dits, dont les principaux usages consistent dans leur utilisation comme pierre de construction et comme pierre à chaux ou à ciment.

Les calcaires employés dans l'édification des bâtiments ou des ouvrages d'art se distinguent en calcaires compacts, argileux, siliceux, glauconieux, globulaires, coquilliers, grossiers, terreux, travertins et tufs.

Le calcaire compact est à grain très fin (exemple : pierre lithographique). Il a une cassure esquilleuse ou conchoïdale. Pur, il est résistant. Sa coloration dépend des oxydes de fer ou des matières bitumineuses ou charbonneuses qui s'y trouvent renfermés. Il contient de 1 à 3 0/0 de matières étrangères.

Le calcaire argileux, qui renferme de l'argile en plus ou moins grande quantité, donne par la cuisson des chaux hydrauliques ou des ciments.

Le calcaire siliceux (grès de Fontainebleau) renferme des grains quartzeux entourés d'une gangue calcaire.

Le calcaire glauconieux est vert noirâtre ou jaunâtre. Il contient du silicate ferreux et potassique. Parfois il est jaune ou brun.

Le calcaire globulaire peut être pisolithique ou oolithique. Dans le premier cas, il est caractérisé par des concrétions isolées, souvent sphériques, assez importantes; dans le second cas, les grains ressemblent à des œufs de poisson ou à des grains de millet.

Le calcaire coquillier (pierre d'Euville) est composé de coquilles fossiles agglutinées.

Le calcaire grossier à variétés nombreuses (liais, cliquart, faux-liais, roche, banc franc, banc royal, vergelé, lambourde, Saint-Leu, etc.) est très employé dans la construction des édifices; il constitue les assises du bassin parisien.

Le calcaire terreux ou craie (blanc de Meudon) se remarque à cause de sa cassure terreuse ou blanche.

Les travertins et les tufs calcaires contiennent des cavités plus ou moins importantes.

ANALYSE CHIMIQUE

Pour certaines pierres naturelles, comme les grès par exemple, l'analyse chimique montre que les qualités supérieures sont fournies par les pierres possédant une teneur élevée en quartz et en silice.

Mais c'est surtout pour les calcaires à chaux ou à ciment que l'analyse rend de signalés services. Elle permet de prévoir d'une façon à peu près certaine ce que donnera la cuisson de ces pierres. Il est imprudent d'exploiter une carrière en vue d'obtenir de la chaux ou du ciment si des analyses faites sur des matériaux extraits de divers points des bancs n'ont pas montré la possibilité d'obtenir de bons produits. Un chaufournier a un intérêt de premier ordre à connaître si la composition de ces bancs est invariable; la méconnaissance de ce principe peut le conduire à une fabrication désastreuse.

L'analyse s'effectue la plupart du temps de la même façon, qu'il s'agisse d'une roche naturelle quelconque ou d'un calcaire. On pourra donc considérer que le mode opératoire indiqué pour la détermination de la composition chimique des calcaires s'applique à très peu de chose près aux autres pierres de construction.

Avant de commencer l'analyse proprement dite, on soumet l'échantillon aux opérations préliminaires suivantes :

Dissolution du calcaire. — Par sa cuisson, le carbonate de calcium pur fournit de la chaux grasse. Le caractère particulier d'un tel calcaire est de se dissoudre entièrement dans les acides, l'acide chlorhydrique par exemple.

Le calcaire impur, plus ou moins argileux, donne par sa calcination un ciment ou une chaux hydraulique. La dissolution de ce calcaire dans l'acide chlorhydrique est incomplète. Il reste au fond du vase dans lequel on fait l'expérience un résidu boueux formé de sable et d'argile. La proportion plus ou moins considérable de ce résidu fournit déjà une approximation sur le degré d'hydraulicité que présentera la matière cuite.

État physique du calcaire. — Généralement, par le simple aspect du calcaire, et, le cas échéant, par l'examen microscopique à la loupe, on peut constater la plus ou moins forte proportion de sable quartzeux et d'argile. Toutefois, si le calcaire ne comporte que de minimes quantités de ces éléments, ces traces ne sont mises en évidence que par l'analyse.

Homogénéité des bancs et intimité du mélange de calcaire, de sable fin et d'argile. — L'hétérogénéité des bancs calcaires exerce une influence désastreuse, au point de vue de leur exploitation industrielle. Aussi est-il indispensable de s'assurer que le mélange du calcaire avec le sable fin et l'argile forme bien une masse homogène. Pour cela, on examine attentivement le poids et la nature du résidu insoluble laissé par la matière traitée dans un verre par l'acide azotique étendu. Il va sans dire que la partie ainsi traitée représente la moyenne d'échantillons prélevés en plusieurs points

du banc. Si les bancs paraissaient différents, cette expérience est renouvelée pour chacun d'eux.

Le résultat fourni peut être peu satisfaisant. Dans ce cas, il y a lieu d'examiner si des considérations locales permettent d'employer la double cuisson. Par ce procédé, le produit provenant d'une première calcination est soumis à un broyage qui le rend homogène; une seconde cuisson complète alors les actions chimiques qui ont eu lieu par voie sèche.

Proportion de sable fin et d'argile. — Ces éléments sont à peu près inattaquables à froid par l'acide azotique très étendu; à chaud, l'argile est partiellement décomposée.

Pour faire l'essai, on met dans un verre à pied 5 grammes de calcaire que l'on attaque par l'acide azotique très étendu d'eau. On pèse le résidu; on l'examine ensuite à la loupe.

En négligeant l'action que, malgré tout, le réactif a pu exercer sur l'argile, on peut considérer que, si le calcaire ne contient pas un minimum de 8 à 12 0/0 de sable fin ou d'argile, il ne donnera pas par la cuisson de produit notablement hydraulique.

Proportion de sable quartzeux ou de gros sable. — Quand les calcaires renferment du sable quartzeux, la grosseur des grains a une influence incontestable sur la durée de la cuisson; il en résulte que quelquefois il est indispensable de recourir à une double cuisson.

La détermination de la grosseur du grain présente donc une certaine importance. Elle se fait de la façon suivante :

Vingt grammes de calcaire étant grossièrement pulvérisés, de façon à éviter l'écrasement des grains de sable, on procède au lavage dans une grande capsule de porcelaine, puis on sépare les parties fines du calcaire et du sable, ainsi que la plus grande partie de l'argile, en opérant par décantations successives. Les gros grains de sable et de calcaire restés au fond de la capsule sont traités ensuite par l'acide azotique étendu (ou par l'acide chlorhydrique), qui dissout la partie calcaire et laisse le sable quartzeux, ce dernier ayant pu toutefois retenir une faible partie de sable fin ou d'argile.

Après un simple lavage qui suffit à séparer les grains quartzeux, ceux-ci sont séchés et versés dans une capsule tarée pour être pesés.

Une fois ces essais terminés, on procède à l'analyse de la façon suivante.

Résidu insoluble dans les acides. — On verse 2 grammes de calcaire pulvérisé dans un ballon en verre ; on attaque par l'acide chlorhydrique étendu. Il se produit une vive effervescence due au dégagement de l'acide carbonique. On chauffe légèrement afin de compléter l'attaque sans décomposer l'argile. On laisse refroidir, on décante sur un filtre en papier sans plis, on sèche, on calcine et on pèse. Le poids trouvé est celui de l'*argile* et du *sable*.

Si l'on désire séparer ces deux éléments, on procède à une *lévigation* du résidu, opération analogue à celle précédemment indiquée pour la détermination du gros sable.

Alumine et oxyde ferrique. — La liqueur filtrée provenant de l'opération précédente est additionnée de quelques gouttes d'acide azotique, puis portée à l'ébullition. L'oxyde ferreux passe ainsi à l'état d'oxyde ferrique. On ajoute de l'ammoniaque. Il y a précipitation de l'alumine et de l'oxyde ferrique. Après refroidissement, on recueille le précipité sur un filtre, on le dessèche, on le calcine et on le pèse.

Chaux. — Dans le liquide filtré précédent, on ajoute une quantité suffisante d'une solution d'oxalate d'ammonium. La chaux est précipitée à l'état d'oxalate de calcium. Après dessiccation, on calcine le précipité au soufflet d'émailleur. On obtient ainsi de la *chaux caustique* CaO.

On peut aussi calciner le précipité à température moins élevée, au-dessus d'une lampe à alcool. Le produit obtenu est alors du carbonate de calcium $CaCO^3$. Ce dernier mode d'opérer est parfois préféré au précédent :

$$CaO = 0{,}56 \times CaCO^3.$$

Magnésie. — Dans le liquide filtré obtenu, on ajoute un peu de solution de phosphate de sodium. Il se produit un

précipité de phosphate ammoniaco-magnésien qui, séparé et calciné, donne du pyrophosphate de magnésium, duquel on déduit la teneur en magnésie :

$$MgO = 0{,}360 \times P^2O^7Mg^2.$$

Eau et anhydride carbonique. — L'eau hygrométrique s'obtient en portant 2 grammes de substance, réduite en poudre, à la température de 100° C. pendant deux heures. Une pesée subséquente fait connaître la perte de poids correspondant à l'eau hygrométrique.

La *perte au feu*, c'est-à-dire la proportion d'eau et d'anhydride carbonique réunis, s'effectue en portant au rouge vif, pendant cinq minutes, un creuset de platine taré, muni de son couvercle, et contenant 2 ou 3 grammes de calcaire pulvérisé; on pèse après refroidissement.

Dans le cas où la substance contient des *matières organiques*, il convient d'en déduire le poids du précédent.

Matières organiques. — On agit sur un nouveau poids de la matière en poudre (2 grammes), que l'on attaque par l'acide chlorhydrique étendu. Le résidu est filtré, desséché et pesé; il est ensuite calciné dans une capsule tarée que l'on porte au rouge vif pendant dix minutes. On pèse après refroidissement.

La différence entre les deux pesées donne la quantité de matières organiques contenues dans l'échantillon.

Il peut être utile de connaître le poids de l'acide carbonique seul. Le procédé suivant permet d'arriver assez vite à faire cette détermination. On se sert à cet effet de l'appareil de Berzélius et de Rose.

Cet appareil (*fig.* 77) se compose d'un petit ballon en verre *a* dans lequel on met le calcaire (2 grammes) et de l'eau. Ce ballon communique au moyen de tubes en verre, d'une part, avec un tube *b* contenant de l'acide chlorhydrique et, d'autre part, avec un tube *c* renfermant une substance desséchante (chlorure de calcium ou pierre ponce imbibée d'acide sulfurique).

Avant de se servir de cet instrument, on commence par en prendre le poids. On incline ensuite doucement le ballon de façon à provoquer l'écoulement de l'acide du tube *b* dans le ballon *a*. Il y a alors attaque et effervescence. L'acide carbonique et la vapeur d'eau se dégagent et se rendent dans le tube *c* où la vapeur d'eau seule est absorbée par la substance desséchante, le gaz se dégageant dans l'atmosphère.

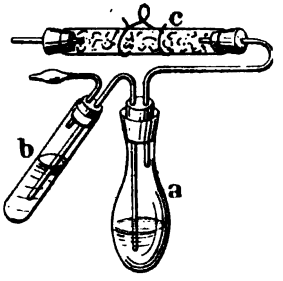

FIG. 77. — Appareil de Berzélius et de Rose.

On complète l'attaque en chauffant légèrement le ballon; on chasse les dernières traces d'acide carbonique par une aspiration opérée à l'extrémité du tube *c*.

On pèse à nouveau l'appareil.

La différence entre les deux pesées donne le poids de l'acide carbonique contenu dans le calcaire.

D'autres appareils de formes différentes, basés sur le même principe, permettent de faire la même détermination.

En supposant le calcaire formé de poids atomiques de carbonate de calcium et de carbonate de magnésium dans les proportions trouvées par l'analyse en chaux et en magnésie, on a ainsi un autre moyen de calculer approximativement la proportion d'anhydride carbonique contenue; ce gaz est composé des $\frac{44}{56}$ de la chaux augmentés des $\frac{44}{40}$ de la magnésie. Le poids ainsi trouvé, déduit de la perte au feu, donne l'eau et les matières combustibles.

Enfin on peut encore recourir à la méthode qui consiste à déterminer la perte de poids subie à l'étuve par 5 grammes de calcaire en poudre maintenus à 100° jusqu'à ce que deux pesées successives soient concordantes. La différence de poids représente l'eau. En retranchant ce nombre de celui de la perte au feu, on a la teneur en anhydride carbonique cherchée.

Eau. — La différence entre la perte au feu, déduction faite des matières organiques, et l'anhydride carbonique seul, donne le poids de l'eau totale.

Lévigation. — Cette opération, déjà mentionnée plus haut, consiste à séparer le sable de l'argile en attaquant le calcaire en poudre (10 ou 20 grammes) par de l'acide azotique ou de l'acide chlorhydrique étendu. Des décantations successives à l'eau pure permettent d'éliminer la partie argileuse. La partie non attaquée est recueillie, desséchée et pesée ; elle ne comprend que le sable.

Séparation de l'alumine et de l'oxyde ferrique. — Le précipité obtenu dans le cours de l'analyse est formé de la réunion de l'alumine et de l'oxyde ferrique.

On reprend ce précipité par un peu d'acide chlorhydrique. Lorsque la dissolution est complète, on ajoute dix fois environ le poids du résidu d'acide tartrique ou d'acide citrique. Ces acides organiques empêchent la précipitation ultérieure de l'alumine. On ajoute de l'ammoniaque, puis du sulfure d'ammonium. Il y a précipitation du sulfure de fer que l'on filtre, dessèche, calcine et que l'on pèse à l'état d'oxyde ferrique Fe^2O^3. L'alumine se déduit par différence.

On peut encore opérer différemment. Dans le précipité d'alumine et d'oxyde ferrique redissous par l'acide chlorhydrique, on verse de la potasse en excès. On porte à l'ébullition. L'oxyde ferrique précipité est recueilli sur un filtre et lavé. Dans la liqueur filtrée, on précipite l'alumine par l'addition d'un sel ammoniacal. On redissout le précipité par l'acide chlorhydrique et on recommence la précipitation de l'oxyde ferrique qui a échappé à la première opération en ajoutant à nouveau de la potasse. On renouvelle une troisième fois l'expérience si cela est utile. Tous les précipités successifs réunis, calcinés et pesés fournissent de l'oxyde ferrique.

Enfin, on détermine aussi la teneur en fer par le procédé Margueritte en se servant d'une liqueur titrée de permanganate de potassium. La dissolution chlorhydrique des deux oxydes est d'abord ramenée au minimum d'oxydation au

moyen du zinc et de l'acide sulfurique. On verse la liqueur titrée jusqu'à ce que la coloration rose apparaisse. Tout le fer est alors passé au maximum. Il est facile de déduire la teneur en fer et par suite en oxyde ferrique d'après la quantité de permanganate employée. La réaction produite est la suivante :

$$2MnO^4K + 10FeSO^4 + 8SO^4H^2 = K^2SO^4 + 2MnSO^4 + 5[(Fe^2)(SO^4)^3] + 8H^2O.$$

Manganèse. — Une grande quantité de calcaires renferment du manganèse. Si la teneur est importante, ce que l'on reconnaîtra immédiatement par un essai qualitatif, on doit s'en préoccuper. Dans ce cas, voici comment il convient de modifier la marche de l'analyse.

Le résidu insoluble est séparé comme il a été dit plus haut. A la liqueur chlorhydrique filtrée on ajoute quelques gouttes d'acide azotique : on porte à l'ébullition. On sature la liqueur à chaud par du carbonate de sodium jusqu'à ce qu'elle présente un léger trouble. On ajoute de l'acétate de sodium et on fait bouillir. Il se produit un précipité d'acétates basiques de fer et d'aluminium. On filtre, on redissout le précipité et on recommence une deuxième précipitation dans des conditions identiques. Les liqueurs filtrées sont réunies. On ajoute un peu de brome à faible température. L'oxyde MnO^2 se précipite en liqueur légèrement ammoniacale. On filtre, on calcine et on pèse Mn^3O^4.

L'analyse se poursuit de la façon qui a été indiquée pour le calcaire.

ANALYSE SOMMAIRE

Il est certain que toutes les opérations précédentes ne peuvent être faites que par un chimiste exercé.

Mais, de même que certains essais simples doivent précéder l'analyse, de même on peut faire quelques déterminations analytiques, et les uns comme les autres peuvent être effectués par une personne quelconque du moment qu'elle y apporte un peu de soin.

C'est ainsi que l'on peut apprécier d'une façon approximative, mais souvent suffisante, la quantité d'acide carbonique et de chaux ou même de carbonate de calcium que contient un calcaire. On considère la différence comme représentant l'argile.

Anhydride carbonique (seul). — *Première méthode.* — Dans un ballon en verre *a*, on verse une certaine quantité d'acide chlorhydrique étendu (20 à 30 centimètres cubes, par exemple). On pèse le ballon.

On y laisse tomber 2 grammes de calcaire.

On ferme l'ouverture du ballon au moyen d'un bouchon présentant quelques rainures ou plus simplement à l'aide d'un petit morceau de carton *b* muni d'une épingle et faisant l'office de soupape (*fig.* 78). Il se dégage de l'acide carbonique provenant de la réaction du carbonate de calcium sur l'acide chlorhydrique, et un peu de vapeur d'eau. Quand l'effervescence a cessé, on insuffle de l'air, puis on pèse à nouveau l'appareil. La différence entre les deux pesées représente le poids de l'acide carbonique augmenté d'une certaine quantité d'eau entraînée.

FIG. 78.—Ballon.

Deuxième méthode. — Une autre méthode, permettant de supprimer le trébuchet d'analyse indispensable dans le cas précédent, consiste à placer sur l'un des plateaux d'une

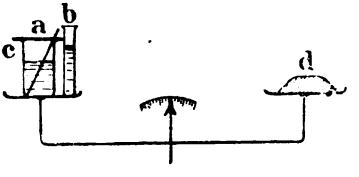

FIG. 79. — Balance de Roberval.

balance de Roberval (*fig.* 79) : un verre cylindrique *c* contenant 100 grammes de calcaire en poudre et de l'eau; une éprouvette *b* renfermant 150 centimètres cubes environ d'acide chlorhydrique concentré ; un morceau de carton *a*, for-

mant recouvert le petit tube au-dessus du vase cylindrique.

On fait équilibre sur l'autre plateau de la balance à l'aide d'une tare *d*.

On verse ensuite, par portions successives, l'acide de l'éprouvette dans le verre cylindrique en recouvrant celui-ci, après chaque addition du réactif, du morceau de carton qui a pour but d'empêcher les projections dues à l'effervescence. On replace aussitôt l'éprouvette sur le plateau de la balance.

Quand la dissolution est complète, on rétablit l'équilibre au moyen de poids qui représentent l'acide carbonique dégagé et l'eau évaporée; car, ainsi que dans la méthode précédente, une certaine quantité d'eau se trouve entraînée.

Chaux. — Parmi les divers procédés qui peuvent être employés pour la détermination de cet élément, on indiquera seulement les deux méthodes suivantes :

1° *Méthode basée sur l'emploi de la formule* $CaCO^3$. — Connaissant la quantité d'acide carbonique CO^2 contenue dans un calcaire, l'application de la formule du carbonate de calcium $CaCO^3$ conduit de suite au résultat cherché.

44 grammes d'anhydride carbonique correspondent, en effet, à 56 grammes de chaux, si l'on admet que l'acide carbonique est entièrement combiné à la chaux et qu'il n'y en a aucune partie en combinaison avec la magnésie.

2° *Autre méthode.* — Dans trois verres, on verse une même quantité d'acide chlorhydrique 10 centimètres cubes par exemple .

Le premier verre est conservé tel quel.

Dans le second, on laisse tomber 1 gramme de carbonate de calcium pur marbre blanc, quantité inférieure à celle nécessaire à la saturation de l'acide.

Dans le troisième, on ajoute 1 gramme de l'échantillon.

Une fois les attaques terminées, on colore les liqueurs en rouge par l'addition de quelques gouttes de teinture de tournesol.

Au moyen d'une burette graduée, contenant une liqueur normale de potasse, de soude ou de saccharate de chaux, on verse cette liqueur progressivement jusqu'à l'obtention de la coloration bleue. On s'arrête à ce moment précis.

On a employé pour chacun des vases un nombre de divisions de la burette que l'on désignera par les lettres D, d et d'.

Les quantités d'acide libre correspondent donc à D, D — d et D — d'.

Or, le poids de carbonate de calcium contenu dans l'échantillon est à celui de 1 gramme mis en expérience dans le rapport des alcalis de l'échantillon à celui des alcalis du marbre, c'est-à-dire que l'on a la relation :

$$\frac{x}{1} = \frac{D - d'}{D - d}.$$

Il est bon de remarquer que dans cette opération les bases autres que la chaux (magnésie, alumine, oxyde de fer) ne sont pas comprises dans le chiffre calculé.

ESSAIS

Les pierres de construction peuvent être soumises aux essais indiqués ci-dessous.

Structure. — Cette observation se fait, suivant le cas, au simple aspect sans instrument grossissant, ou, au contraire, au moyen de la loupe et du microscope. La structure peut être aciculaire, adélogène, amygdaloïde, arénacée, bacillaire, bréchiforme, bulleuse, cariée, caverneuse, cellulaire, compacte, concrétionnée, cristalline, crochue, cylindrique, feuilletée, fibreuse, fluidale, lamellaire, lamelleuse, ligneuse, oolithique, pétrosiliceuse, phanérogène, porphyrique, porphyroïde, poudinguiforme, prismatique, schisteuse, scoriacée, spongieuse, terreuse, trachytique, tuberculeuse, tubuleuse, vacuolaire, vitreuse, zoogène.

Cassure. — Lorsque l'on rompt une roche quelconque, on observe également la cassure qui affecte l'une des formes ci-après : anguleuse, argiloïde, arrondie, bombée, bossuée, cireuse, conchoïdale, conoïde, cristalline, dentelée, écailleuse,

eczémateuse, esquilleuse, feuilletée, glandulaire, globuleuse, granuleuse, grenue, gréseuse, lamellaire, lamelleuse, laminaire, ligneuse, lisse, lustrée, mamelonnée, noduleuse, onduleuse, plane, plate, plissée, raboteuse, rocailleuse, rugueuse, saccharoïde, schisteuse, spathique, striée, tabulaire, unie, vallonnée, vermiculée.

Homogénéité. — Il ne s'agit pas ici de l'homogénéité considérée au point de vue d'une composition chimique ou minéralogique semblable, mais de l'homogénéité en général montrant la présence ou l'absence de fils, poils, moyes, bousin, clous, cendres, terrasses ou pouffes. Il est évident qu'une proportion notable de ces défauts ferait rejeter une pierre devant servir à la construction d'un ouvrage important.

Couleur. — La couleur offre un grand intérêt au point de vue de la décoration architecturale des édifices. Elle est due à la présence d'oxydes métalliques colorés.

Conductibilité thermique. — Cette propriété physique a généralement peu d'importance; d'ailleurs le coefficient qui la représente est très faible pour les roches.

Dilatation linéaire. — Il est assez rare que l'on en tienne compte. Voici des chiffres indiquant le coefficient de dilatation linéaire entre 0 et 100° de quelques matériaux.

Grès de Liver-Roch (Angleterre).....	0,0000117
Calcaire de Caen.....	0,0000089
Marbre blanc de Carrare.....	0,0000085
Granite de Diélette (Manche).....	0,0000079
Calcaire de Saint-Leu.....	0,0000065
Marbre noir.....	0,0000043

Hygroscopicité. — Elle est variable suivant les pierres. Les roches granitiques compactes ne renferment que quelques dixièmes ou quelques centièmes pour cent d'eau. Les calcaires peuvent en contenir de 3 à 20 0/0 et les marnes jusqu'à 40 0/0.

Densité. — La densité des roches est une propriété importante en ce sens qu'elle est souvent liée à la stabilité des constructions. Dans l'établissement de voûtes, on recherche au contraire des pierres légères.

Le basalte est la pierre la plus lourde, ce qui n'a rien de surprenant, étant donnée la forte proportion de fer qu'il contient, ainsi que sa grande compacité; il pèse jusqu'à 3.100 kilogrammes par mètre cube. La pierre ponce est la plus poreuse; elle ne pèse que 650 kilogrammes.

Gélivité. — L'agent principal de destruction des pierres est la congélation de l'eau contenue dans les interstices. Les pierres gélives sont celles qui s'effritent sous l'action de la gelée. Ces pierres se résolvent peu à peu en éclats, par suite de l'expansion de la glace, au grand dommage de leurs arêtes vives si elles sont taillées.

On peut constater la gélivité d'une pierre au moyen du procédé Brard. On trempe un fragment de l'échantillon, terminé autant que possible à arêtes vives, dans une solution saturée de sulfate de sodium; on l'y laisse séjourner, puis on le retire et on le soumet à un courant d'air à une température voisine de 15°. Une évaporation rapide se produit. On lave ensuite la pierre parsemée de cristaux. Ce lavage entraîne les fragments de la pierre désagrégée. De la plus ou moins grande quantité de fragments enlevés au bloc essayé, on en déduit le degré de gélivité. Il est d'ailleurs facile de comparer entre elles plusieurs pierres en opérant sur des échantillons de forme géométrique, par exemple des cubes de quelques centimètres de côté. En l'absence de tout autre essai rapide, ce procédé, malgré son imperfection, est d'une utilité incontestable et d'une grande simplicité.

M. Braun a essayé de ramener au calcul l'effet de la gélivité. Il a établi une formule basée sur l'effort exercé par l'expansion de la glace, l'élasticité, la porosité et la résistance de la pierre; mais ce procédé a été abandonné à cause de l'incertitude des résultats qu'il fournissait.

Le procédé actuellement employé dans les laboratoires consiste à soumettre des échantillons cubiques de $0^m,07$ d'arête à 25 gels et dégels successifs et à examiner la ma-

nière dont ces cubes se sont comportés. Ces échantillons, d'abord séchés à l'étuve et pesés à l'état de siccité, sont ensuite saturés d'eau. On les essuie, on les soumet pendant quatre à cinq heures à un froid de — 10° à — 15°. On les expose pendant une demi-heure à la température ambiante, puis on les plonge dans de l'eau à + 15°. On les soumet de nouveau à la température de — 10° à — 15°. On renouvelle vingt-cinq fois cette expérience. Après chaque immersion on examine

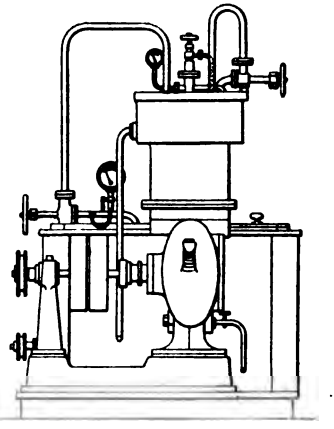

Fig. 80. — Machine Douane et Jobin (Geliodi).

les échantillons à la loupe afin de constater s'il s'est produ des fissures. La machine frigorifique employée peut être une machine à glace à chlorure de méthyle du genre de celle de MM. Douane, Jobin et Cie, dont la figure 80 donne un aperçu.

Dureté. — La dureté des roches est très différente. Ainsi la craie se laisse facilement rayer par l'ongle, tandis que le porphyre ne se laisse pas entamer par le fer. Pour le porphyre, il est même indispensable de recourir à des outils en acier trempé pour en faire la taille. Le quartz et le feldspath augmentent la dureté d'une roche.

On se rend compte de la dureté d'une pierre en pesant, au

bout d'un temps donné, les débris résultant du frottement sur cette pierre d'émeri ou de sable quartzeux, ou encore en mesurant la profondeur à laquelle s'enfonce une scie après un certain temps.

A ce genre d'essais se rattache l'usure des matériaux d'empierrement, que l'on détermine au moyen de l'appareil imaginé par M. le conducteur principal des ponts et chaussées Deval. Cet appareil (*fig.* 81) se compose de huit cylindres en tôle fermés par des couvercles étanches. Ces cylindres, inclinés sur un axe horizontal, font avec celui-ci un angle d'environ 30°. Ils forment deux séries disposées en sens

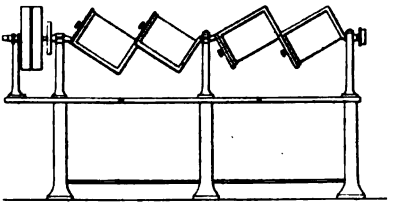

Fig. 81. — Appareil Deval.

inverse et tournent autour de cet axe. Chaque cylindre reçoit 5 kilogrammes de pierres cassées préalablement lavées et séchées. On imprime à l'appareil une vitesse de 2.000 tours à l'heure. L'opération dure cinq heures. On recueille alors la poussière provenant de l'usure des matériaux. On lave, dessèche et pèse cette poussière. De la quantité trouvée, on en déduit la valeur relative de la dureté des matériaux d'empierrement.

L'appareil de M. le conducteur principal Dorry, basé sur un principe différent, s'applique surtout à l'usure des matériaux de pavage et de dallage. Avec cet appareil on mesure la profondeur dont s'usent les matériaux quand, sous une charge donnée, ils subissent l'action du frottement d'un sable normal régulièrement répandu sur une piste circulaire métallique horizontale mobile.

Les échantillons affectent la forme de prismes rectangulaires de $0{,}04 \times 0{,}06 \times 0{,}08$; ils sont placés dans des boîtes

que l'on met dans des cages pratiquées à cet effet sur le bâti de la machine (*fig.* 82). Des poids additionnels sont ajoutés pour maintenir l'échantillon sur la piste. Le sable normal employé s'écoule régulièrement dans des stries pratiquées sur la piste. La vitesse de l'appareil est de 2.000 tours à l'heure. Les produits de l'usure rejetés hors de la piste tombent dans des tiroirs situés au-dessous. L'opération se poursuit pendant deux heures. Au bout de chaque phase de

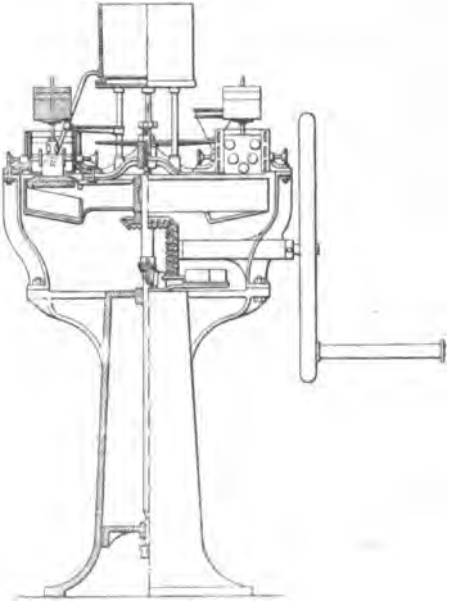

Fig. 82. — Appareil Dorry.

1.000 tours on arrête le mouvement de la machine et on mesure la diminution de hauteur.

Une autre machine inventée par M. l'ingénieur Muller peut également servir à déterminer l'usure des matériaux. Dans cet appareil un bloc useur mobile, reposant sur le

bloc à essayer fixe, est animé d'un mouvement rectiligne alternatif.

Résistance à l'écrasement. — On sait qu'une pierre de bonne qualité offre une grande résistance à l'écrasement. Anciennement, cette résistance était appréciée au moyen de l'appareil Michelot. Malgré la précision que donne cet appareil, on lui préfère la presse hydraulique, moins encombrante, dont le maniement est beaucoup plus facile et qui donne des résultats suffisants dans la pratique.

La résistance à l'écrasement est en relation avec la densité, la texture, l'homogénéité et la cohésion des éléments constituant la pierre.

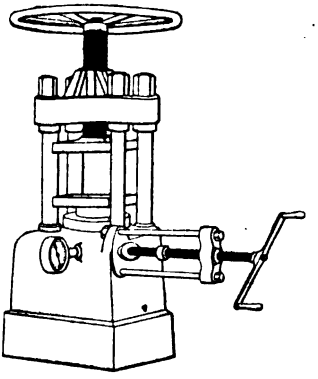

Fig. 83.— Presse Michaëlis.

La presse Michaëlis (*fig.* 83) a un piston de $0^m,0922$ de section. On la met en mouvement à l'aide d'un volant qui fait manœuvrer une vis exerçant un effort primitif de 2 tonnes sur la pierre à essayer. Une autre vis horizontale permet de développer entre les deux plateaux de la machine une pression pouvant atteindre 70 tonnes. Trois manomètres font partie de l'appareil. Deux d'entre eux mesurent l'effort exercé, le troisième sert pour le contrôle.

PRATIQUE DES ESSAIS

ÉCHANTILLONS

Les échantillons de pierres de construction adressés à un laboratoire d'essais seront accompagnés d'une note faisant connaître le nom commercial de la pierre, la carrière et le

banc d'où ils ont été extraits. On y joindra, autant que possible, une coupe de la carrière représentant la succession et l'épaisseur des bancs et les emplacements où ont été pris les échantillons. On indiquera la formation géologique à laquelle appartient la carrière (d'après les divers auteurs).

Les emplois auxquels la pierre est destinée seront spécifiés.

Les échantillons seront simplement dégrossis, en forme de prismes rectangulaires ayant au moins $0^m,30$ de côté et de hauteur égale à celle des bancs dans lesquels ils ont été prélevés. Si la hauteur d'un banc était trop grande, on prendrait les échantillons à différentes hauteurs dans le banc.

Le sens du lit de carrière sera figuré sur les échantillons.

Le laboratoire d'essais fera connaître la composition minéralogique des échantillons, la couleur et la texture de la pierre.

La finesse du grain sera désignée d'après la classification suivante :

a) Sans coquilles apparentes; quelques coquilles ; coquillier; très coquillier.

b) Grains très fins formés ou amorphes ($0^{mm},2$ à $0^{mm},4$); grains fins formés ou amorphes ($0^{mm},3$ à $0^{mm},8$); grains assez fins ($0^{mm},5$ à $1^{mm},2$); grains moyens ($1^{mm},0$ à $2^{mm},5$); grains un peu grossiers (2 à 4 millimètres); grains grossiers (3 à 5 millimètres) ; grains très grossiers (5 millimètres et au delà).

ÉPROUVETTES

Les éprouvettes d'essai sont débitées au laboratoire, à la scie ou au fil, afin d'éviter des fissures dont on ne s'apercevrait pas.

Les éprouvettes devant être essayées soit suivant le lit de carrière, soit perpendiculairement à ce lit, il importe de prendre les dispositions nécessaires dans le prélèvement et la préparation des éprouvettes d'essai.

La résistance de la pierre aux différents efforts variant souvent avec son état d'imbibition d'eau, les éprouvettes sont soumises aux essais, soit seulement à l'état sec, soit à l'état sec et à divers degrés d'imbibition.

Les procès-verbaux indiquent l'état dans lequel les éprouvettes ont été expérimentées (sec ou mouillé avec le degré d'imbibition s'il y a lieu), ainsi que le sens suivant lequel l'essai a été fait par rapport au lit de carrière.

Pour amener les éprouvettes à l'état sec, on les expose, dans une étuve ou dans tout autre appareil ou même à l'air libre, à une température de + 30 à + 40° C., jusqu'à ce que leur poids demeure invariable.

Pour les avoir à divers états d'imbibition[1], il suffit de les plonger dans l'eau un temps suffisant. On facilite l'absorption en plongeant les pierres graduellement dans l'eau; au commencement de l'expérience, on les immerge de quelques centimètres, puis, lorsque la capillarité les a imbibées jusqu'à la partie supérieure, on les immerge complètement dans l'eau; on les laisse immergées un temps plus ou moins long suivant le degré d'imbibition que l'on désire.

Pour imbiber les pierres dans un délai suffisamment abrégé, on peut se servir du procédé suivant :

On place les éprouvettes sous la cloche d'une machine pneumatique; on fait le vide à des degrés différents; puis on fait entrer l'eau par le sommet de la cloche jusqu'à immersion complète, on remet après quelques minutes l'intérieur de la cloche en communication avec l'air extérieur[2].

Le degré d'imbibition des échantillons est indiqué par la comparaison de leur poids à sec et après imbibition.

1. Les divers états d'imbibition sous lesquels on expérimente les pierres sont ordinairement les suivants :

1° Imbibition après vingt-quatre heures d'immersion comptées à partir de l'instant où la pierre est mise au contact de l'eau;

2° Imbibition jusqu'à saturation naturelle considérée comme telle quand deux pesées faites à vingt-quatre heures d'intervalle donnent les mêmes résultats.

Ces deux états d'imbibition correspondent sensiblement : l'imbibition après immersion de vingt-quatre heures, à l'état des pierres près un séjour prolongé sur le sol dans un dépôt; l'imbibition jusqu'à saturation naturelle, à l'état des pierres employées soit dans eau ou à son contact, soit dans la terre humide.

2. Le vide partiel à faire pour obtenir une imbibition égale à la aturation naturelle, amenée par immersion prolongée, correspond ensiblement au maintien sous la cloche d'une pression faisant quilibre à une colonne de mercure de 260 millimètres de hauteur.

DENSITÉ

Pour déterminer la densité apparente des éprouvettes, on opère de la façon suivante :

1° Les éprouvettes à l'état sec sont mesurées avec un pied à coulisse ordinaire donnant l'approximation au dixième de millimètre; le poids est déterminé avec une balance sensible au demi-centigramme;

2° Pour les éprouvettes imbibées d'eau, on se sert d'une balance hydrostatique[1] assez sensible pour indiquer exactement la deuxième décimale.

Le poids qu'aurait l'éprouvette pesée dans l'air est obtenu en ajoutant, au poids de la pesée sous l'eau, le poids d'un volume égal d'eau.

RÉSISTANCE A L'ÉCRASEMENT

Les essais de résistance à l'écrasement peuvent être faits au moyen d'appareils à levier ou au moyen de presses hydrauliques.

Les éprouvettes sont placées entre les plaques de compression, recouvertes d'une feuille de carton mince; il est utile qu'un des deux plateaux de compression soit mobile dans tous les sens.

Les éprouvettes ont la forme de cubes[2] à faces rigoureu-

1. Par cette méthode on évite la déperdition d'une certaine quantité de l'eau absorbée ou la difficulté d'enlever par essuyage une même quantité d'eau pour chacun des échantillons.

2. Il résulte des essais comparatifs faits au laboratoire des Ponts et Chaussées, sur des éprouvettes de forme cubique et de forme prismatique, que les éprouvettes de forme cubique donnent un maximum de résistance pour une pierre quelconque non homogène, tandis que, pour une pierre bien homogène, le maximum de résistance est obtenu avec des éprouvettes en forme de prismes à base carrée dont la hauteur est double de l'arête de la base. On a aussi établi que les cubes de pierre bien homogène résistent proportionnellement à leur section horizontale.

sement parallèles[1]. Elles sont aussi grosses que possible d'après la résistance présumée de la pierre et la force maxima de la machine d'essai.

Les dimensions des faces portantes sont indiquées dans le procès-verbal d'essai en même temps que la résistance rapportée au centimètre carré de surface portante.

L'essai porte au moins sur trois éprouvettes du même échantillon. La moyenne des résultats fournis est calculée.

POROSITÉ

Les règles établies pour mesurer la porosité des mortiers s'appliquent aux pierres.

RÉSISTANCE A LA RUPTURE PAR FLEXION

Les essais de résistance à la rupture par flexion se font au moyen de prismes posés sur deux couteaux et chargés en leur milieu d'une façon continue jusqu'à rupture.

Les essais normaux sont faits avec des prismes à section carrée de $0^m,02$ de côté et de $0^m,12$ de longueur, posés sur deux couteaux distants de $0^m,10$ et chargés en leur milieu; on opère sur trois prismes au moins par échantillon et on indique les poids bruts qui ont déterminé la rupture[2].

1. Pour reconnaître si les faces sont bien parallèles, on peut employer l'appareil micrométrique imaginé par M. Klein sous la direction de M. l'inspecteur général Durand-Claye, appareil pouvant servir aussi à déterminer la compressibilité des pierres.

2. Si l'on est conduit à essayer des pierres à la rupture par flexion sous forme de prismes n'ayant pas les dimensions fixées pour l'essai normal, on rend les résultats sensiblement comparables à ceux qu'eût donnés l'essai normal en multipliant la charge de rupture par l'espacement des couteaux et divisant par le produit du carré de la hauteur du prisme par sa largeur augmentée d'un quart.

RÉSISTANCE A L'USURE PAR FROTTEMENT

Pour déterminer la résistance à l'usure par frottement, on mesure la quantité dont s'usent les échantillons lorsque, sous une charge donnée, ils subissent le frottement d'un sable normal répandu régulièrement sur une piste circulaire horizontale en fonte, qui se meut avec une vitesse déterminée.

Les échantillons ont comme dimensions : $0^m,06$ sur $0^m,04$ de base et une hauteur maxima de $0^m,10$ à $0^m,12$; ils sont posés deux à deux de part et d'autre de l'axe et sur un même diamètre de la meule, de telle façon que leur centre se trouve sur une circonférence de $0^m,261$ de rayon, la petite dimension étant dirigée perpendiculairement au rayon.

La charge totale sur le plan de frottement est de 250 grammes par centimètre carré.

Le sable normal employé est obtenu en pilant, puis tamisant du grès quartzeux de Fontainebleau moyennement dur, passant au travers du tamis n° 50 (324 mailles) et retenu complètement sur le tamis n° 200 (4.900 mailles).

La quantité de sable à répandre sur la meule est d'un litre par éprouvette et par mille tours de meule.

On fait tourner l'appareil à raison de 1.000 tours par demi-heure et l'on fait subir aux échantillons 4.000 tours de meule. On mesure la diminution de hauteur de l'échantillon et on détermine la perte de poids qu'il a subie. La même constatation est faite au cours de l'essai après 1.000, 2.000 et 3.000 tours.

On peut retourner l'échantillon bout pour bout après 2.000 tours de meule afin de comparer les résultats obtenus sur la face inférieure et sur la face supérieure.

RÉSISTANCE A LA GELÉE

L'épreuve de la résistance à la gelée doit normalement porter sur des éprouvettes cubiques de 7 centimètres d'arête.

On peut admettre exceptionnellement des dimensions plus faibles pour les pierres très dures.

Les essais normaux de gélivité comprennent :

a) La détermination de la résistance à la compression de la pierre essayée sur lit, resséchée après gels et dégels successifs répétés jusqu'à vingt-cinq fois, et la comparaison de cette résistance avec celle de la pierre primitive essayée sur lit à l'état sec et à l'état d'imbibition jusqu'à saturation.

b) La détermination de la perte de poids de la pierre gelée vingt-cinq fois.

c) L'examen de la pierre gelée avec le secours de la loupe, en cherchant à se rendre compte si des gerçures ou des éclatements se sont produits.

Il faut employer pour ces essais au moins :

3 éprouvettes à l'état sec;

3 éprouvettes imbibées d'eau à l'état de saturation;

3 éprouvettes imbibées d'eau à l'état de saturation à soumettre à l'essai de gélivité proprement dit[1].

Si l'on veut faire la comparaison de la résistance à l'écrasement en délit, il faut un nombre double d'éprouvettes.

Dans l'exécution de ces essais, on doit tenir compte des détails suivants :

a) On se sert pour l'immersion d'eau distillée, prise à la température de + 15 à + 20° C., ou, à défaut d'eau distillée, d'eau potable, prise à la même température, qui n'offre pas d'inconvénient quand on ne tient pas à déterminer la quantité de sels solubles.

b) Les éprouvettes sont exposées à une température de — 15 à — 20° C.

c) La durée d'exposition au froid est de quatre heures.

d) Le dégel s'accomplit par immersion complète de chaque éprouvette de 7 centimètres d'arête dans un volume

1. On fait généralement les essais de gélivité sur des éprouvettes aux deux états d'imbibition indiqués précédemment : imbibition après immersion de vingt-quatre heures et imbibition jusqu'à saturation naturelle. Le nombre des éprouvettes à soumettre à l'essai de gélivité proprement dit est alors augmenté de trois au moins.

de 500 centimètres cubes d'eau distillée ou d'eau potable à la température de + 15 à + 20° C.[1].

Les matériaux pierreux employés à la construction des chaussées font l'objet des prescriptions suivantes.

OBSERVATION GÉNÉRALE SUR LES CONCLUSIONS A TIRER DES ESSAIS

On ne peut, en général, en ce qui concerne les chaussées et les matériaux employés à leur construction, que faire des essais sur les matériaux isolés.

L'application aux chaussées mêmes des résultats obtenus sur les matériaux isolés ne peut être faite qu'avec une extrême réserve et beaucoup de circonspection, eu égard aux influences extérieures prépondérantes sur la conservation des chaussées, qui ne paraissent pas actuellement susceptibles de mesure, influences telles que les circonstances météorologiques, la circulation, la nature du sol de fondation, etc.

D'une façon générale, les résultats des essais ne peuvent s'appliquer convenablement dans la pratique que si les matériaux sont homogènes.

EMPIERREMENTS

En ce qui concerne les chaussées empierrées, les essais à faire sont de trois sortes :

1° Composition granulométrique;

1. Pour les éprouvettes essayées à l'état d'imbibition après immersion de vingt-quatre heures, le dégel s'accomplit dans l'air humide et non dans l'eau. Dans l'intervalle qui sépare les gels et les dégels successifs, les cubes d'essai sont conservés dans des bocaux fermés pour éviter une trop grande déperdition de l'eau absorbée; de plus, on a soin, avant de les soumettre à une nouvelle action du froid, de les plonger quelques instants dans l'eau, de manière à leur conserver pendant toute la durée de l'essai sensiblement le même degré d'imbibition qu'ils avaient au début de l'expérience.

2° Composition minéralogique;
3° Essais proprement dits des diverses pierres.

Prise d'échantillon. — L'échantillon doit comprendre, d'une part, des matériaux tels qu'ils sont destinés à l'emploi; d'autre part, des morceaux aussi gros que possible des matériaux de la carrière et en nombre correspondant, autant que possible, aux diverses natures de ces matériaux.

Une note annexe donne des renseignements sur la carrière même à divers points de vue (nature géologique, mode d'exploitation, etc.).

Composition granulométrique. — On détermine la proportion de matériaux traversant des claies inclinées à 45° et dont la largeur libre entre les tringles varie de centimètre en centimètre.

A cet effet, on opère sur 50 kilogrammes de matériaux.

On appelle « cailloux » les matériaux ne traversant pas la claie de 1 centimètre et au-dessus.

La détermination de la composition des matériaux traversant la claie de 1 centimètre a lieu au moyen de tamis horizontaux, en tôle perforée, suivant les règles prescrites pour les essais des sables.

On appelle « gravier » les matériaux traversant la claie de 1 centimètre et ne traversant pas la tôle perforée de 5 millimètres, et « matières terreuses et sableuses » tout ce qui traverse cette dernière tôle.

Composition minéralogique. — On détermine et on indique la nature minéralogique des divers matériaux constituant l'échantillon.

Essais proprement dits des pierres. — On soumet les échantillons des pierres aux essais suivants, conformément aux règles prescrites pour les essais de pierres :

Densité;
Dureté;
Résistance à l'écrasement;
Porosité;
Résistance à la gelée.

En outre, il y a lieu de faire des essais d'usure par frottement et par choc des matériaux les uns sur les autres [1].

A cet effet, on emploie un appareil composé de huit [2] boîtes cylindriques en tôle de $0^m,20$ de diamètre et de $0^m,34$ de profondeur, accouplées quatre par quatre sur deux arbres en fer carré parallèles et distants de $0^m,405$. Ces deux arbres sont rendus solidaires par un engrenage et tournent avec la même vitesse. Chaque arbre est coudé au droit de chaque cylindre dont l'axe se trouve incliné d'environ 30° sur l'horizontale. Sur chaque arbre, deux paires de cylindres sont disposés symétriquement.

On opère sur 5 kilogrammes de l'échantillon à essayer, dont les pierres ont été préalablement purgées, par un lavage, de toute poussière adhérente. Puis, on ferme chaque cylindre par un couvercle hermétique à joints de caoutchouc.

La rotation doit être parfaitement uniforme et donner 2.000 tours par heure.

Un compteur de tours établi sur l'un des arbres, fréquemment consulté, permet de contrôler la régularité de la marche de la machine.

Au bout de cinq heures, c'est-à-dire 10.000 tours, on arrête l'appareil, on ouvre le cylindre et on verse le contenu dans des bassines.

On lave avec soin le cylindre ainsi que son couvercle et les eaux de lavage sont reçues dans les bassines. Chaque pierre est ensuite lavée et brossée sous l'eau et débarrassée

1. Ces essais ne s'appliquent qu'à des matériaux cassés et constitués par des cailloux homogènes. Les résultats obtenus sont négatifs avec des cailloux roulés, pour lesquels l'usure par frottement est presque nulle. Avec des matériaux à gangue extérieure friable, l'usure est considérable et ne correspond pas aux résultats de la pratique

2. L'appareil ici décrit est l'appareil complet tel qu'il a été indiqué par la Commission des Routes nationales dans son rapport du 15 octobre 1880. Cet appareil permet de comparer simultanément sept échantillons à un huitième pris pour type. Mais il est évident que l'appareil peut être simplifié et réduit à deux cylindres.

ainsi de la poussière, qui reste dans les eaux de lavage à l'état de boue claire.

Cette boue est jetée sur deux passoires superposées dont les trous ont respectivement $0^m,01$ et $0^m,0016$ de diamètre.

On la sépare ainsi en trois lots comprenant:

1° Les grains qui ne passent pas à l'anneau de $0^m,01$;

2° Ceux qui passent à cet anneau, mais qui ont plus de $0^m,0016$;

3° La boue proprement dite et les grains de moins de $0^m,0016$.

Le premier lot est rejeté et réuni aux pierres de l'échantillon.

Le second est conservé à titre de renseignements.

Le troisième lot est desséché et pesé. Son poids, rapporté à 5 kilogrammes, exprime par convention le coefficient cherché.

PAVAGES ET DALLAGES

Prise d'échantillons. — Le nombre des échantillons prélevés est d'autant plus grand que les matériaux, d'après leur lieu de provenance, sont moins homogènes.

Le lieu d'extraction est toujours indiqué avec sa description.

Essais. — Des essais sont faits conformément aux règles prescrites pour les essais de pierre naturelle, en ce qui concerne :

La densité ;
La dureté ;
La résistance à l'écrasement;
La résistance à la rupture par flexion ;
La porosité;
La résistance à la gelée.

Provenance et nature des matériaux. — Une notice est produite sur la carrière, sa nature géologique, son mode d'exploitation, l'homogénéité des produits, etc...

La nature minéralogique des échantillons est indiquée.

Essais des matériaux avant emploi. — On recommande, avant l'emploi, la vérification individuelle des matériaux étalés un par un sur une surface plane. La nature du son, produit par le choc d'un marteau, paraît donner d'utiles renseignements sur l'homogénéité d'un même pavé et pouvoir déceler la présence de fils ou délits.

L'arrosage général des pavés et la constatation de la rapidité de leur dessiccation paraît donner des renseignements utiles sur l'homogénéité de la fourniture.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

1° **Analyse chimique.** — Les conclusions à tirer de la composition chimique des pierres naturelles sont d'importance très différente suivant qu'il s'agit de matériaux destinés à la construction des édifices ou de calcaires dont la cuisson fournit les liants hydrauliques servant à l'agrégation des maçonneries.

Dans le premier cas on analyse la pierre pour connaître, par exemple, si elle contient en abondance un élément utile ou nuisible, mais cela n'est pas toujours nécessaire.

Voici les éléments chimiques qui se rencontrent le plus fréquemment dans les matériaux :

Oxygène. — C'est le corps le plus abondant, parce qu'il entre dans la composition des oxydes et de l'eau et que ces composés sont en somme les constituants des roches.

Silicium. — C'est le corps simple le plus répandu après l'oxygène. On le trouve combiné à l'oxygène sous forme de silice. On sait que la silice offre une inaltérabilité tout à fait remarquable.

Carbone. — Dans les roches, on le rencontre à l'état d'hydrocarbure ; dans les calcaires, il s'y trouve à l'état de carbonate.

Soufre. — Les matières volcaniques renferment du soufre

natif. On remarque encore sa présence dans le gypse (sulfate) et dans les pyrites (bisulfure de fer).

Hydrogène. — Uni à l'oxygène, ce métalloïde compose l'eau hygrométrique ou combinée.

Potassium, sodium. — Les argiles, les schistes argileux, les calcaires, l'eau salée contiennent de la potasse et quelquefois de la soude.

DÉSIGNATION DES MATÉRIAUX	RÉSIDU INSOLUBLE DANS LES ACIDES		MATIÈRES SOLUBLES DANS LES ACIDES			PERTE au FEU
	Sable	Argile	Alumine et oxyde ferrique	Chaux	Magnésie	
Pierre de la Maladrerie dite de Caen.	0,10	10,60	0,90	48,30	0,30	39,80
Pierre d'Argentan (Orne)	0,90	1,30	1,15	53,05	0,05	43,55
Tuffeau de Montsoreau (Maine-et-Loire)	28,10	20,55	1,80	24,90	0,60	24,05
Pierre de Valognes (Manche)	0,15	0,35	1,35	54,10	0,05	44,00
Tuffeau d'Antoigné (Vienne)	25,75	19,60	0,70	38,20	0,25	25,50
Tuffeau de Loches (Indre-et-Loire)	7,75	16,00	1,10	40,85	»	34,30
Pierre du Parc (Nord)	0,50	0,60	0,35	54,30	0,50	43,75
Marbre de Marbaix (Nord)	0,80	1,55	0,25	53,10	0,95	43,35
Pierre de Caumont (Eure)	0,10	0,65	0,55	54,80	0,15	43,75
Liais de Bagneux (Seine)	2,00	1,10	0,40	52,95	0,55	43,00
Roche de Châtillon (Seine)	2,40	0,50	0,50	53,10	0,50	43,00
Roche de Saillancourt (Seine-et-Oise)	1,15	0,25	1,85	53,10	0,40	43,25
Banc royal de Conflans (Seine-et-Oise)	10,80	1,25	0,50	47,80	0,45	39,20
Vergelé de St-Maximin (Oise)	13,05	1,10	0,40	46,85	0,55	38,05
Liais de Vendresse (Aisne)	10,50	7,10	0,40	45,10	0,30	36,60
Roche d'Hermonville (Marne)	2,25	1,85	0,85	52,00	0,45	42,60
Liais de Courville (Marne)	4,90	0,45	0,85	50,90	0,35	42,55
Pierre de Souppes (Seine-et-Marne)	0,10	0,05	0,25	55,50	0,20	43,90
Pierre de Châteaulandon (Seine-et-Marne)	0,05	0,05	0,35	55,35	»	44,20
Pierre de Lérouville (Meuse)	0,35	0,05	0,45	54,85	0,40	43,90
Pierre de Comblanchien (Côte-d'Or)	»	0,65	0,40	55,00	0,45	43,50
Marbre blanc de St-Béat (Haute-Garonne)	»	0,85	0,35	54,80	0,30	43,70
Grès bigarré de Merville (Meurthe-et-Moselle)	96,75	»	1,35	0,30	0,10	1,50
Grès rouge de Belval	95,10	»	2,60	0,15	0,45	1,70
Grès houiller de St-Etienne	7,80	85,35	2,10	0,50	0,50	3,75
Grès calcarifère d'Aignan (Gers)	30,15	5,35	3,25	33,30	0,15	27,80

Calcium. — Les carbonates, les sulfates et les phosphates de calcium sont les exemples les plus frappants de la fréquence de ce corps.

Magnésium. — La magnésie accompagne très souvent la chaux dans ses manifestations naturelles. Les sulfates et chlorures de magnésium sont des sels faisant partie de la composition chimique des eaux.

Fer. — On l'observe à l'état d'oxyde, de sulfure, de carbonate, de silicate dans les roches auxquelles il communique une teinte plus ou moins foncée suivant sa teneur ou suivant son degré d'oxydation.

Manganèse. — Il accompagne très souvent le fer et ses composés.

Aluminium. — Ce corps est très répandu sous la forme d'alumine.

On rencontre encore d'autres corps dans les roches; mais, comme leur rôle est de faible importance, on les passera sous silence.

La composition chimique de quelques pierres naturelles est donnée dans le tableau de la page 149.

Si l'on examine les résultats fournis par l'analyse, on remarque que les marbres et les meilleures pierres à bâtir proviennent de calcaires à peu près purs. Par contre, des pierres contenant une forte proportion d'argile et de sable, comme le vergelé parisien et le tuffeau de Montsoreau, sont des matériaux de faible résistance. Une forte proportion d'argile est une présomption d'une moins bonne qualité de la pierre.

Mais où l'analyse chimique devient non seulement utile, mais indispensable, c'est pour la détermination de la composition des calcaires destinés à fournir les agglomérants. Il serait téméraire d'entreprendre une fabrication de chaux ou de ciment sans avoir préalablement soumis à l'analyse les pierres des divers bancs que l'on se propose d'utiliser. On risquerait autrement d'obtenir tantôt un ciment, tantôt une

chaux hydraulique, suivant que tel banc serait plus ou moins riche en argile, ce qui se produit quelquefois.

On verra plus loin (chap. XIX, *Chaux et Ciments*) l'influence exercée par chaque élément constitutif.

On sait par expérience que, par une cuisson convenable, les matériaux contenant :

Moins de 5 0/0		d'argile fournissent	de la chaux grasse.
De 5 à 12 0/0		—	de la chaux maigre.
— 12 à 15 0/0		—	de la chaux faiblement hydraulique.
— 15 à 17 0/0		—	de la chaux moyennement hydraulique.
— 17 à 20 0/0		—	de la chaux éminemment hydraulique.
— 20 à 25 0/0		—	de la chaux-limite ou ciment de Portland.
— 25 à 30 0/0		—	du ciment romain.
— 30 à 40 0/0		—	du ciment de qualité médiocre.
Plus de 40 0/0		—	de la pouzzolane.

Connaissant l'un des éléments d'un calcaire hydraulique, on peut calculer soit l'indice, soit les autres éléments (l'indice étant considéré comme le rapport de l'argile à la chaux). Ces questions peuvent être résolues de la façon indiquée par M. l'Inspecteur général Debauve dans son *Traité de matériaux de construction*, auquel sont empruntées les lignes suivantes :

1° Un calcaire naturel renferme B parties pour 100 de calcaire pur et par conséquent (100 — B) d'argile et de silice ; quel est l'indice de la chaux qu'il fournira ?

La quantité B de calcaire pur renferme $\frac{56}{100}$ de chaux vive ; donc :

$$i = \frac{100 - B}{0{,}56B}.$$

Exemple : Un calcaire naturel renferme 70 0/0 de carbonate de calcium ; il donnera une chaux d'indice égal à :

$$\frac{0{,}30}{0{,}56 \times 70} = 0{,}76.$$

2° Un calcaire naturel renferme D parties pour 100 d'acide carbonique ; quel sera l'indice de la chaux qu'il fournira ?

A D parties d'acide carbonique correspondent $\frac{56}{44} \times D$ parties de chaux vive et $\frac{100}{44}$ D parties de calcaire; par suite, il y a dans 100 parties de la pierre $\left(100 - \frac{100D}{44}\right)$ d'argile et de silice et l'indice est :

$$i = \frac{100 - \frac{100D}{44}}{\frac{56}{44}D}.$$

Exemple : 100 parties d'un calcaire renferment 40 0/0 d'acide carbonique; à cette quantité d'acide carbonique correspond $40 \times \frac{56}{44}$ ou 50,9 de chaux vive et 90,9 de calcaire pur; reste 9,1 d'argile et l'indice est $\frac{9,1}{50,9} = 0,18$.

3° Combien un calcaire naturel d'indice i renferme-t-il d'argile et de calcaire pour 100 parties ?

$$\text{Argile} = i \times \text{chaux vive} = i \times \frac{56}{100} \text{ calcaire pur.}$$

Mais :

$$\text{Argile} + \text{calcaire pur} = 100.$$

Donc :

$$\text{Calcaire pur} = \frac{100}{1 + i \times \frac{56}{100}} = \frac{10.000}{100 + 56i}.$$

Exemple : Un calcaire d'indice 0,4 renferme 81 de carbonate de calcium et 19 d'argile.

2° **Essais.** — L'appréciation de la valeur des calcaires destinés à la fabrication des chaux hydrauliques et des ciments relève, comme il a été dit, presque exclusivement de l'analyse

chimique. Mais, en ce qui concerne les pierres à bâtir, il est un autre critérium de leur qualité ; ce sont les essais. Parmi ceux-ci l'essai de résistance à l'écrasement offre une importance capitale.

Le constructeur trouvera dans le catalogue des échantillons de matériaux de construction réunis par les soins du ministère des travaux publics, à l'occasion de l'Exposition universelle de 1878, des renseignements utiles sur la charge d'écrasement d'un grand nombre de pierres de taille, la hauteur d'assise des bancs, l'étage géologique, les qualités et emplois remarquables, le poids et le prix du mètre cube, etc.

Les pierres ne travaillent pas généralement à la traction c'est la raison pour laquelle on ne les soumet guère à des essais de ce genre. Néanmoins, il convient de se rappeler que la pierre résiste beaucoup moins à un effort de traction qu'à un essai d'écrasement, ainsi qu'il résulte des chiffres fournis par le tableau ci-dessous :

DÉSIGNATION DES MATÉRIAUX	CHARGE DE RUPTURE à la traction par cm^2 en kilogrammes
Basalte d'Auvergne	77
Calcaire de Portland	60
Calcaire compact	32
Calcaire arénacé	23
Calcaire oolithique	14
Roche de Bagneux	15
Vergelé	7

La dureté comparative des pierres obtenue par l'un des moyens indiqués dans le cours de ce chapitre peut être ainsi représentée (Reynaud) :

Marbre blanc veiné	1,00
Pierre de liais	0,88
Marbre bleu turquin	1,28
Granite gris de Normandie	7,00
— — de Bretagne	8,56
— — des Vosges	8,92
— feuille morte	9,30
— vert	9,70
— antique rose (syénite)	10,08

L'usure des matériaux a aussi donné lieu à des essais comparatifs. On trouvera ci-dessous les résultats publiés par M. Muller et obtenus avec son appareil.

NATURE DES PRODUITS SOUMIS A L'EXPÉRIENCE	COEFFICIENT DE DURETÉ Résultats de l'expérience
Matière qui ne serait pas usée après 20.000 tours.	0
Quartzite des pavés bleus	11
Granit des trottoirs	31
Grès bigarré de St-Germain	55
Trachyte d'Aurillac	64
Pierre lithographique de Fuveau	76
Pierre marbre de Comblanchien	80
Pierre bleue sciée de Soignies-Lave-de-Volvic.	106
Grès rouge de plaine	107
Marbre dit de Ste-Anne	134
Pierre de la Fosse en Breuil	163
Grès vosgien d'Epinal	165
Pierre grise de Vendargues (Hérault)	214
Pierre d'Argentan	227
Liais de Lézinnes, dit de Tonnerre	244
Pierre de Chauvigny	255
Grès bigarré d'Epinal	282

EXTRAIT DU CAHIER DES CHARGES GÉNÉRAL DU MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

ART. 2. — *Matériaux d'empierrement.* — Les matériaux d'empierrement sont choisis parmi les meilleurs des provenances indiquées au devis particulier. Ils sont purgés, avant l'emmétrage, de terre, de sable, ou de toute autre substance étrangère.

ART. 4. — *Pavés.* — Les pavés et les boutisses sont choisis parmi les meilleurs des provenances indiquées au devis particulier. Ils sont d'un grain fin, serré et homogène ; ils ne contiennent ni fils, ni parties tendres, ni délits : ils ne sont pas gélifs ; ils doivent rendre un son clair sous le marteau.

ART. 8. — *Pierres pour béton.* — Les pierres cassées, cailloux ou graviers destinés à la confection du béton proviennent des bancs non gélifs et les plus durs des carrières indiquées. Ils sont complètement purgés de terre, passés à la claie et lavés s'il y a lieu.

ART. 9. — *Qualités générales des moellons de toute espèce.* — Les moellons de toute espèce proviennent des meilleurs bancs des carrières indiquées ; ils sont durs, bien gisants, sans fils, non gélifs, dégagés de toute gangue ou terre, propres et lavés s'il est nécessaire.

Les moellons ne sont employés en parement qu'après avoir perdu leur eau de carrière. Ils sont extraits, autant que possible, avant l'hiver qui précède la mise en œuvre.

ART. 14. — *Pierres de taille.* — Les pierres de taille proviennent des meilleurs bancs des carrières indiquées : elles sont homogènes, non gélives, exemptes de tous défauts, tels que fils et bousins, pleines, d'un grain égal, ayant toutes les qualités requises pour offrir, après la taille, un parement très régulier.

Elles doivent rendre un son clair sous le choc du marteau ; celles qui rendraient un son sourd, qui contiendraient des parties tendres ou s'écraseraient en grains sablonneux, au lieu de se briser en éclats à arêtes vives, sont rejetées.

Elles sont extraites avant l'hiver qui précède la mise en œuvre, placées en délit et exposées aux pluies et aux gelées avant d'être taillées.

ART. 15. — *Dalles pour recouvrement d'aqueducs.* — Les dalles pour recouvrement d'aqueducs sont saines, homogènes et non gélives.

CHAPITRE XIV

ARDOISES

L'ardoise est un schiste du groupe des roches silicatées que l'on rencontre dans les terrains du système cambrien.

En France, ses gisements principaux se trouvent dans l'Anjou, dans les Ardennes (Rimogne, Fumay, Monthermé, Deville), à Caumont (Calvados), à Brive (Corrèze), à Rochefort-sur-Terre (Morbihan), à Carhaix, Châteaulin et Port-Launay (Finistère), à Renazé (Mayenne), à Saint-Mur-de-Bretagne (Côtes-du-Nord), à Saint-Créac et Lugagnan (Hautes-Pyrénées), etc.

Les feuillets que l'on détache de ces schistes sont de faible épaisseur; ils ont une surface plane, lisse et luisante. La poudre provenant de leur pulvérisation est douce au toucher.

La densité de l'ardoise varie de 2,64 à 2,95. La coloration noire n'est pas toujours l'indice d'un produit de qualité supérieure. Il existe d'excellentes ardoises possédant des teintes bleuâtres, violacées, vertes et rouges.

On peut dire qu'en général les deux qualités essentielles d'une ardoise sont la solidité et la résistance aux agents atmosphériques. En outre, l'ardoise doit être homogène, compacte, non poreuse, imperméable, élastique, résistante, non gélive, infusible, mauvaise conductrice de la chaleur, inattaquable aux acides.

Ces qualités s'apprécient par l'analyse et par les essais.

ANALYSE CHIMIQUE

La destruction rapide des schistes ardoisiers provient du peu de résistance qu'offrent certains d'entre eux à l'action des agents atmosphériques (gelée, pluie, vent ou encore à celle des vapeurs et produits gazeux qui se dégagent des cheminées. Dans ce dernier cas, il est utile de procéder à l analyse des ardoises, afin de connaître si leur composition les met à l'abri de ces causes de détérioration.

Pour effectuer l'analyse de ces matériaux, il faut les désagréger à l'aide des carbonates de potassium et de sodium, car ils sont peu attaquables par l'acide chlorhydrique.

Silice. — On prend 1 gramme d'ardoise finement pulvérisée que l'on met dans un creuset de platine avec 5 grammes d'un mélange de carbonates alcalins. On chauffe progressivement le creuset de manière à arriver insensiblement à la température de la fusion tranquille, que l'on maintient pendant dix minutes environ. On refroidit ensuite rapidement le creuset et on reprend le culot formé avec de l'acide chlorhydrique étendu. On sépare la silice insoluble par filtration.

Alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie, alcalis. — La liqueur filtrée provenant de l'opération précédente subit les mêmes traitements que s'il s'agissait d'analyser une chaux. On se reportera donc pour la suite des manipulations à ce qui est dit au chapitre XIX : *Chaux et Ciments.*

Perte au feu. — La différence de poids entre une prise de grammes avant et après calcination au rouge vif donne la perte au feu, qui comprend l'eau, l'anhydride carbonique , s'il en existe, les matières combustibles et volatiles.

Soufre. — Ce dosage est basé sur la transformation du soufre et des sulfures en acide sulfurique au moyen d'un

oxydant énergique, et sur la précipitation de cet acide en sulfate de baryum par le chlorure de baryum.

Essai chimique. — A l'analyse chimique proprement dite se rattache un essai simple, l'essai Brünner emprunté à Frésénius. Dans un vase contenant 100 centimètres cubes d'eau saturée d'acide sulfureux, on suspend une plaque d'ardoise de $0^m,07 \times 0^m,13$ fixée à l'extrémité d'un fil. La plaque doit se trouver au-dessus de la surface du liquide. On bouche le vase et on abandonne le tout pendant un temps variable.

Une ardoise de mauvaise qualité s'altère au bout de quelques jours d'exposition. Il se produit une exfoliation. Elle devient friable. Une bonne ardoise ne s'altère qu'après quatre à six semaines. L'ardoise de qualité supérieure résiste plusieurs mois à cette action.

Voici quelques exemples d'analyses d'ardoises :

ÉLÉMENTS DOSÉS	ARDOISES		
	D'ANGERS (d'après d'Aubuisson)	DE L'ISÈRE	DE ROCHEFORT (d'après M. Autissier)
Silice	48,60	54,50	53,30
Alumine	23,50	22,20	25,48
Oxyde ferrique	11,30	9,60	7,80
Chaux	»	0,40	2,90
Magnésie	1,60	1,00	2,40
Alcalis	4,70	1,90	2,51
Anhydride sulfurique	»	1,30	»
Perte au feu	7,60	8,80	5,20
Produits non dosés et pertes.	2,70	0,30	0,21
TOTAUX	100,00	100,00	100,00

La durée d'une ardoise paraît dépendre de sa teneur en pyrite et en carbonate de calcium. D'autre part, la pyrite cristallisée est quelquefois considérée comme ayant un effet moins désastreux que la pyrite disséminée dans la masse.

ESSAIS

Une ardoise peut être soumise aux essais sommaires suivants : flexibilité, perméabilité et porosité.

Essai de flexibilité. — Sur une surface bien plane, on pose de champ une pièce de 0 fr. 10, sur laquelle on applique le milieu de l'ardoise. Aux extrémités de cette ardoise on exerce, avec les mains, une pression graduelle jusqu'à ce que les bords viennent toucher la surface plane. S'il ne se produit pas une rupture, l'ardoise est considérée comme ayant une flexibilité suffisante.

Essai de perméabilité. — On borde une ardoise avec un petit bourrelet de cire formant une espèce de banquette sur le pourtour. On verse ensuite de l'eau dans l'enceinte ainsi formée. Une bonne ardoise ne doit pas se laisser traverser par le liquide.

Essai de porosité. — On plonge un morceau d'ardoise de forme rectangulaire dans un récipient rempli d'eau. L'ardoise s'imbibe partiellement. Elle s'imprègne d'eau en plus grande quantité par la tranche que par les faces. Connaissant le poids primitif de l'échantillon à l'état de siccité et le poids acquis au bout d'un temps donné, on peut, par comparaison avec des types connus, se rendre compte du degré de porosité de l'échantillon.

Rupture par flexion. — Le dispositif suivant a été adopté par la Commission des Ardoisières d'Angers pour des essais de rupture exécutés sur des plaques de grande dimension.

La plaque ou dalle a 1 mètre de longueur, 3 à 15 centimètres de largeur et 10 à 70 millimètres d'épaisseur. Elle est soutenue par deux rouleaux en bois dur formant les semelles de deux étriers A et B fixés symétriquement aux deux extrémités d'une barre CD maintenue en son milieu par une pince (*fig.* 84). Deux entretoises assurent l'égalité de longueur

entre les étriers. La force fléchissante est appliquée au milieu de AB par l'intermédiaire de la vis d'une machine d'essai de traction et de l'étrier E disposé comme les précédents. La

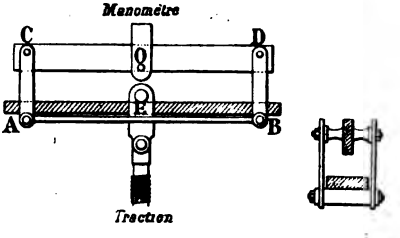

Fig. 84. — Appareil de la Commission des Ardoisières d'Angers.

mesure de l'effort produit se détermine au moyen d'un manomètre à mercure ou d'une romaine. Le coefficient de résistance est donné par la formule :

$$R = \frac{3Pl}{2bc^2},$$

dans laquelle :

R est le coefficient de résistance à la rupture,

P, la charge de rupture ;

l, la longueur de la dalle ou l'écartement des supports;

b, la largeur de la dalle ;

c, l'épaisseur de la dalle.

Les chiffres obtenus à la suite d'expériences répétées sont les suivants pour les ardoises d'Angers :

PROVENANCE	VALEUR DE $\frac{R}{10^6}$	
	SUR PLAT	SUR CHAMP
Fresnais	7.374	7.328
Grands-Carreaux	8.823	7.474
Petits-Carreaux	7.359	6.775
Paperie	6.120	»

D'autre part, M. Blavier a fait des expériences sur des ardoises carrées de 0,25 reposant par leurs côtés sur un châssis plan. Des charges croissantes étaient appliquées sur une surface d'un décimètre carré.

Voici les résultats de ces essais :

ÉPAISSEUR de L'ARDOISE	CHARGE de RUPTURE
1 millim.	8 kilog.
2 —	35 —
3 —	50 —
4 —	90 —
5 —	120 —
6 —	150 —
7 —	170 —

Comme on le voit, la résistance à la rupture croît plus vite que l'épaisseur. Il y a donc avantage, et ceci est confirmé par l'usage, à employer des ardoises épaisses de préférence aux ardoises de faible épaisseur.

Pour l'ardoise de Rochefort, M. Autissier indique un coefficient de résistance de

$$\frac{R}{10^6} = 11.701^1.$$

Cet ingénieur a opéré sur des ardoises de 3 millimètres d'épaisseur. Pour cette même ardoise, les expériences antérieures de M. Orlowski avaient donné un coefficient de 7.209, mais il faut ajouter que les essais avaient été faits sur des ardoises de moins forte épaisseur.

Élasticité. — Il existe plusieurs types d'appareils servant à déterminer l'élasticité des ardoises.

1. Congrès international des Méthodes d'essai des matériaux de construction, 1900.

L'appareil employé par M. Autissier pour trouver le coefficient d'élasticité du schiste de Rochefort-sur-Terre consiste

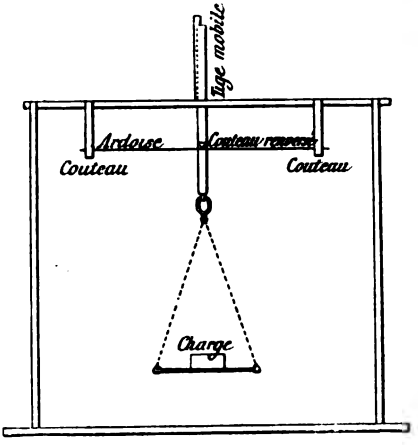

Fig. 85. — Appareil Autissier.

en deux montants verticaux reliés entre eux par une semelle métallique supportant une planchette en bois dur (*fig.* 85).

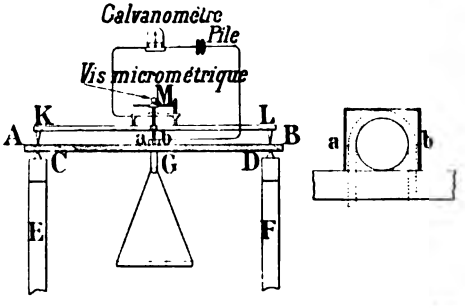

Fig. 86. — Appareil de la Commission des Ardoisières d'Angers.

Cette planchette est munie de deux étriers dont les extrémités inférieures comportent deux couteaux servant d'appuis à la

plaque d'ardoise expérimentée. Une tige mobile suit les variations de cette plaque. La lecture de la flèche se fait sur une échelle graduée.

L'appareil qui a servi aux expériences entreprises par M. Larivière pour la Commission des Ardoisières d'Angers diffère quelque peu du précédent. Il est représenté par la figure 86. La plaque à essayer repose sur deux tasseaux C et D fixés sur des supports E et F. Un étrier G s'appuie par son couteau supérieur sur la plaque AB au milieu de la distance CD. Il est muni à sa partie inférieure d'un plateau sur lequel on met la charge. L'ensemble de l'étrier G et du plateau a été préalablement taré.

Au-dessus de AB se trouve une barre rigide en acier KL reposant sur deux tasseaux terminés par une arête mousse exactement située à l'aplomb des appuis C et D. Une vis micrométrique avec limbe et curseur traverse cette barre en son milieu, de telle sorte que la pointe s'abaissant rencontre l'arête supérieure de l'étrier. Un dispositif spécial représenté à part sur la figure empêche toute erreur dans la lecture. La vis micrométrique et un petit pont se trouvent intercalés dans le circuit naturellement fermé lorsqu'il y a contact. Une pile et un galvanomètre complètent cet ensemble.

Pour faire l'expérience, on enlève d'abord le plateau et l'étrier, puis on établit le contact. On détermine ensuite le nombre de tours et de fractions de tour de vis nécessaires pour rétablir ce contact une fois l'étrier replacé et le plateau chargé. On arrive ainsi à mesurer les flèches à $0^{mm},002$ près. Il est facile d'établir le diagramme des résultats constatés.

Les valeurs moyennes du coefficient d'élasticité $\frac{E}{10^9}$ du schiste d'Angers, déterminées par ce procédé, varient de 11,3 à 12,5.

Écrasement. — Des cubes de $0^m,05$ à $0^m,03$ d'arête, placés entre les plateaux d'une presse hydraulique, ont été comprimés jusqu'au moment où se produit l'écrasement. On a obtenu les valeurs ci-après:

PROVENANCE	CHARGE D'ÉCRASEMENT PAR cm² — COMPRESSION	
	PERPENDICULAIRE A LA STRATIFICATION	PARALLÈLE A LA STRATIFICATION
Grands-Carreaux	1.414	1.100
Fresnais	1.398	876
Hermitage	1.298	885
Petits-Carreaux	1.248	882
Paperie	1.068	852

Des expériences ont été faites sur d'autres produits. Le laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées a trouvé pour des ardoises provenant de la Corrèze :

Poids de l'ardoise	humide	611,33
	sèche	610,00
Quantité d'eau absorbée	par ardoise.	1,33
	pour cent	0,12

Ayant ensuite découpé des bandes de $0^m,041$ de largeur que l'on a posées sur deux appuis espacés de $0^m,20$, on a appliqué la charge au milieu de la surface et on a fait les constatations reproduites dans le tableau suivant :

NUMÉROS des ARDOISES	LARGEUR DES BANDES (b)	ÉPAISSEUR DES ARDOISES (h)	CHARGE DE RUPTURE PAR FLEXION (P)	TENSION DE RUPTURE PAR cm² $R = \frac{3PL}{2bh^2}$
	mètres	mètres	kilogr.	kilogr.
1	0,041	0,0050	29	8,49
2	0,041	0,0050	33	9,66
3	0,041	0,0055	26	9,39
4	0,041	0,0055	35	8,47

Les fragments d'ardoises qui provenaient du découpage

précédent ont été placés sur deux appuis espacés de $0^m,10$. On a laissé tomber sur le centre de chacun d'eux une balle de plomb du poids de 100 grammes en augmentant successivement la hauteur de chute jusqu'à rupture de l'ardoise. Les résultats obtenus sont consignés ci-dessous :

NUMEROS DES ARDOISES	LARGEUR	ÉPAISSEUR	SECTION TRANSVERSALE	HAUTEUR DE CHUTE ayant produit la rupture	FORCE VIVE de la balle de plomb	RAPPORT de la FORCE VIVE à la section
	mètres	mètres	emq.	mètres	kilogr.	
1	0,115	0,005	5,750	1.10	0,11	0,020
2	0,120	0,005	6,000	1,50	0,15	0,025
3	0,120	0,0055	6,600	1,50	0,15	0,023
4	0,125	0,0055	6,875	1,80	0,18	0,026

PRATIQUE DES ESSAIS

Échantillons. — Les échantillons de schistes adressés à un laboratoire d'essais sont accompagnés d'une note faisant connaître le nom commercial de l'ardoise, la carrière et la veine ou couche d'où ils ont été extraits ; on y joint, autant que possible, une coupe de la carrière représentant la succession et l'épaisseur des veines et les emplacements où ont été pris les échantillons. On indique la formation géologique à laquelle appartient la carrière et les fossiles caractéristiques (d'après les divers auteurs), la couleur, les taches, s'il y a lieu, les minéraux disséminés dans la pâte, tels que la pyrite cristallisée ou en dentrites, le carbonate de calcium, le mica, la magnétite. On indique de plus si le clivage est terreux, uniforme ou zoné; si la cassure est grenue, schisteuse ou très schisteuse ; si le schiste présente un « long grain », c'est-à-dire la propriété de se débiter suivant un plan perpendiculaire au clivage et parallèle au fil de pierre ; enfin s'il peut être clivé suivant un plan perpendiculaire à la schistosité et au fil de pierre, c'est-à-dire « querné » suivant l'expression des chantiers.

Le laboratoire d'essai contrôle l'exactitude des renseignements donnés sur les caractères apparents des échantillons, tels que la couleur, la cassure, le clivage; il est fait mention de ces vérifications dans le procès-verbal d'essai.

Éprouvettes. — Les éprouvettes d'essai sont prélevées sur des produits fabriqués restés entiers.

Chaque essai porte au moins sur six ardoises provenant des mêmes couches, choisies parmi celles dont l'épaisseur est la plus régulière. On considère surtout la valeur moyenne des résultats obtenus.

Pour obtenir ces éprouvettes, les ardoises sont débitées au laboratoire à la scie ou au fil, et non au marteau, afin d'éviter des fentes; les faces provenant du clivage sont laissées en leur état naturel. Les éprouvettes sont prélevées dans les parties où les ardoises présentent une épaisseur sensiblement uniforme, les unes parallèlement au grand côté, les autres parallèlement au petit côté.

Les éprouvettes peuvent être essayées soit seulement à l'état sec, soit à l'état mouillé et à divers degrés d'imbibition. Le degré d'imbibition des échantillons est indiqué par la comparaison de leur poids à sec et après imbibition.

Les procès-verbaux d'essai indiquent l'état dans lequel les éprouvettes ont été expérimentées (sec ou mouillé), ainsi que le sens de l'ardoise suivant lequel elles ont été découpées.

Pour amener les éprouvettes à l'état sec, on les expose, dans une étuve ou dans tout autre appareil ou même à l'air libre à une température de + 30 à + 40° C., jusqu'à ce que leur poids demeure invariable.

Pour les avoir à divers états d'imbibition, il suffit de les plonger dans l'eau un temps suffisant. On facilite l'absorption en plongeant graduellement les ardoises dans l'eau; au commencement de l'expérience, on les immerge de quelques centimètres; puis, lorsque la capillarité les a imbibées jusqu'à la partie supérieure, on les immerge complètement.

Pour imbiber d'eau les éprouvettes dans un délai suffisamment abrégé, on peut se servir du procédé suivant : on les place sous la cloche d'une machine pneumatique; on fait

le vide à des degrés différents; puis on fait entrer l'eau par le sommet de la cloche jusqu'à immersion complète, on remet après quelques minutes l'intérieur de la cloche en communication avec l'air extérieur[1].

Résistance à la rupture par flexion. — Les essais de résistance à la rupture par flexion se font au moyen de plaquettes posées sur deux couteaux et chargées en leur milieu d'une façon continue jusqu'à la rupture.

Les essais normaux sont faits avec des plaquettes ayant $0^m,05$ de largeur, $0^m,21$ à $0^m,22$ de longueur, les faces de clivage étant laissées, comme il a été dit plus haut, à l'état naturel.

L'épaisseur de ces plaquettes est déterminée en prenant la moyenne des différentes épaisseurs, sous le couteau médian, mesurées à un dixième de millimètre près au moins.

Ces plaquettes sont posées sur deux couteaux distants de $0^m,20$ et chargées en leur milieu.

On indique le poids brut qui détermine la rupture de chaque éprouvette ainsi que son épaisseur[2].

Détermination de l'élasticité. — La détermination de l'élasticité se fait sur des plaquettes de mêmes dimensions que celles indiquées pour l'essai de rupture par flexion et choisies de la même manière, posées sur des couteaux distants de $0^m,20$ et chargées en leur milieu.

La lecture des flèches prises sous charge est faite soit à l'aide d'une vis micrométrique, soit à l'aide d'appareils à

1. Le vide partiel à faire pour obtenir une imbibition égale à la saturation naturelle amenée par immersion prolongée correspond sensiblement au maintien sous la cloche d'une pression faisant équilibre à une colonne de mercure de 260 millimètres de hauteur.

2. Si l'on veut comparer les résultats d'essais donnés par des éprouvettes d'épaisseurs différentes, on peut le faire en divisant le produit brut qui a causé la rupture de l'éprouvette par le carré de son épaisseur, les unités étant le kilogramme et le millimètre. On peut, en effet, admettre que la charge qui détermine la rupture varie proportionnellement au carré de l'épaisseur lorsque la distance des points d'appui et la largeur de l'éprouvette restent constantes.

levier amplificateur, en prenant toutes précautions pour éviter l'erreur provenant de la pénétration des couteaux dans les ardoises.

Il convient de vérifier si on revient aux mêmes flèches pour des mêmes charges en chargeant et déchargeant plusieurs fois l'éprouvette.

Dans la limite d'élasticité, c'est-à-dire sous des charges pour lesquelles la flèche reste nulle après le déchargement de l'éprouvette, on calcule le module d'élasticité E à l'aide de la formule :

$$E = \frac{2Pl^3}{ybc^3},$$

dans laquelle l désigne le demi-écartement des supports, b la largeur, c l'épaisseur de l'éprouvette, y la flèche correspondant au poids P. Pour $2l = 0^m,20$, $b = 0,05$, la formule devient :

$$E = 0,4\,\frac{P}{yc^3}.$$

USAGES

Les ardoises s'emploient non seulement comme matériaux de couverture, mais encore sous forme de dalles pour les urinoirs, éviers, devantures de magasins, enseignes, tables de laboratoires, tables de billard, carrelages, ornements pour monuments funèbres, etc. Dans ces divers cas, les essais auxquels sont soumis ces matériaux sont analogues à ceux qui sont employés pour les pierres de construction naturelles.

On applique quelquefois sur l'ardoise une peinture à l'huile et à l'essence ou encore un vernis, ce qui permet de l'employer dans des endroits humides tels que salles de bains, lavabos, etc.

L'ardoise émaillée, c'est-à-dire recouverte d'un enduit passé au four, imite les variétés de marbres, les mosaïques, les panneaux en faïence. Elle sert à la confection de baignoires, vestibules, revêtements hydrofuges, panneaux décoratifs, etc. Son prix est en général inférieur à celui des produits similaires, faïences, laves ou marbres.

Les ardoises ordinaires se posent d'après ce principe que le vide sous le toit ou écartement entre les voliges est égal au pureau, ce qui permet de déterminer aisément les éléments de l'établissement d'une toiture.

Les ardoises reposent sur trois voliges de manière que leur chef de tête affleure le bord supérieur de la première volige et que leur chef de base affleure le bord supérieur de la quatrième volige. Elles doivent être recouvertes aux deux tiers de leur hauteur et attachées alternativement un rang à un clou et l'autre rang à deux clous posés le plus en tête possible, sans cependant approcher à plus de 0,02 des rives du haut et du côté de l'ardoise.

Toutes les ardoises n'étant pas de même épaisseur, il faut avant tout en faire le triage en trois catégories par degré d'épaisseur. On les pose alors, les plus fortes près des égouts ou des chéneaux, les plus minces vers le faîtage.

CHAPITRE XV

AMENDEMENTS. — TERRES. — SABLES

I. — AMENDEMENTS

On désigne sous le nom d'amendements les substances capables de modifier la composition du sol en vue d'assurer le développement normal et la nutrition des plantes que l'on veut y cultiver et de faire acquérir à la terre une plus grande valeur agricole.

On parvient à corriger la nature d'un sol au moyen de diverses opérations appelées marnage, chaulage, plâtrage, écobuage, jachère, irrigation, drainage, etc. Il ne sera question ici que des quatre premières opérations, basées sur l'emploi de matières jouant un rôle chimique en la circonstance.

Marnage. — La marne, dont l'emploi en agriculture (surtout dans les régions granitiques) rend de si grands services, est un calcaire argileux qui jouit de la propriété de se déliter sous l'influence des intempéries. D'autres éléments, en proportion moins considérable, viennent s'ajouter aux précédents. Ce sont : le sable siliceux, le carbonate de magnésium, le sulfate de calcium, les matières organiques.

Quand elle est sèche, la marne happe à la langue ; comme l'argile, elle est avide d'eau.

On la trouve dans les terrains triasique, liasique, portlandien, crétacé ou tertiaire. Elle se présente sous divers

aspects et prend, suivant sa composition, les noms de marne siliceuse, calcaire ou argileuse.

La marne siliceuse sert surtout à améliorer les terres fortes. Elle contient de 10 à 50 0/0 de carbonate de calcium et 40 0/0 de sable.

La marne calcaire, qui est généralement la plus estimée, a son emploi indiqué lorsqu'il s'agit d'amender les terres argileuses. Elle contient de 50 à 95 0/0 de carbonate de calcium.

La marne argileuse est utilisée dans le cas de terres légères ou siliceuses. Sa composition varie de 50 à 75 0/0 d'argile et de 10 à 15 0/0 de calcaire.

Le volume de marne à employer est variable suivant la nature du sol et la richesse du produit. C'est ainsi que, dans des cas différents, on en répand de 50 à 250 mètres cubes, voire même 300 mètres cubes par hectare.

On reconnaît qu'une marne est de bonne qualité quand, sous l'action successive de la chaleur et de l'humidité, elle se délite de manière à former une poudre d'une extrême ténuité. La marne de mauvaise qualité est composée de sable et de noyaux calcaires qui n'ont aucune action sur le sol au moment de l'épandage.

Il est souvent utile de connaître pour une marne donnée la quantité qu'il convient d'employer suivant sa richesse en calcaire et la profondeur des labours quand on veut élever de 3 0/0 la teneur en calcaire d'une terre qui en est dépourvue.

Le tableau suivant permet d'effectuer ce calcul :

QUANTITÉ DE CALCAIRE dans la marne	PROFONDEUR DE LA COUCHE ARABLE					
	8 c/m	11 c/m	14 c/m	16 c/m	19 c/m	22 c/m
	m/c	m/c	m/c	m/c	m/c	m/c
10 0/0	244	324	405	487	568	650
20 —	122	162	202	243	284	325
40 —	61	81	101	122	142	162
60 —	40	54	67	81	94	108
80 —	30	40	51	61	71	81
100 —	24	32	40	49	57	65

Des marnes de diverses provenances ont donné à l'analyse les chiffres suivants :

PROVENANCE	RÉSIDU insoluble dans les acides	ALUMINE et oxyde ferrique	CARBONATE de CALCIUM	CARBONATE de magnésium	PERTE au FEU
Marne d'Argenteuil.....	9,9	3,9	80,5	»	5,7
— de Cheverny (Loir-et-Cher).....	10,9	1,4	80,2	»	7,5
Marne de Belleville.....	46,0	23,0	27,6	»	3,4
— de Francheville (Côte-d'Or).....	2,8	1,4	83,0	1,1	11,7
Marne de Puyreaux (Charente).	19,6	3,8	72,0	1,1	3,5
— de Tournay.....	25,4	14,1	55,6	»	4,9
— d'Epineul (Cher).....	11,0	3,2	79,6	»	6,2

Une substance analogue à la marne, servant parfois aux mêmes usages, se rencontre à l'embouchure de plusieurs rivières de la Normandie : c'est la tangue. Elle est formée de débris coquilliers et d'alluvions d'eau douce. Voici l'analyse d'une tangue recueillie à Beuzeville :

I. — Constitution physique

Sable fin et petits débris de coquilles de moins de $0^{m},0005$ de diamètre	99,3
Débris organiques.....	néant
Matières terreuses et sables impalpables entraînés par l'eau.....	0,7
	100,0

II. — Composition chimique

1° Produits volatils ou combustibles

Eau hygrométrique perdue à 104°.....	0,10
Matières volatiles ou combustibles.....	0,14
Azote.....	traces
A reporter.....	0,24

2° Cendres

Report.....		0,24
Résidu insoluble dans les acides.....	74,71	
Anhydride phosphorique.....	0,09	
Alumine et oxyde ferrique (bases unies à l'anhydride phosphorique).....	1,19	
Carbonate de calcium.....	22,60	
Carbonate de magnésium.....	0,80	
Matières non dosées.....	0,37	
		99,76
		100,00

III. — Matières solubles

	0/0
Matières organiques solubles dans l'eau.	0,01
Matières minérales solubles dans l'eau...	0,08
Matières totales solubles dans l'eau.	0,09
Contenant une proportion pour 100 de chlore égale à.....	0,02

Le tableau suivant donne également la composition de matières du même genre :

		RÉSIDU insoluble dans les acides	ALUMINE et oxyde ferrique	ANHYDRIDE phosphorique	CHAUX	MAGNÉSIE	AZOTE	PERTE au feu
Tangue : entrée de la rade de Brest.		4,70	1,45	»	43,50	4,80	»	45,55
Tangue rivière d'Arguenon	chenal de Plancoët...	40,47	4,83	0,33	15,83	0,97	0,10	37,47
	de la Baulhe	38,17	6,40	0,27	15,93	1,00	0,09	38,14
	du Guildo.....	44,17	2,90	0,27	24,73	1,07	0,04	26,82
	baie de Lancieux.....	40,73	3,57	0,20	19,77	0,93	0,01	34,79

L'observation microscopique de semblables dépôts est aussi très utile dans bien des cas. Elle sert à différencier le quartz, le silex, le mica et l'argile.

Chaulage. — Les agriculteurs se servent, en outre, comme amendements, de chaux grasses et de chaux maigres. Les premières résultent de la calcination de calcaires presque

purs. Elles sont de couleur blanche et possèdent une certaine onctuosité. Par l'extinction, elles foisonnent et donnent une pâte liante et grasse.

Les chaux maigres sont le résultat de la calcination de calcaires impurs. Elles ont généralement une couleur grise. L'extinction ne les fait pas augmenter de volume d'une façon sensible. Elles fournissent une pâte courte et peu liante.

Après emploi, la chaux s'empare petit à petit de l'acide carbonique de l'air et se transforme en carbonate de calcium; aussi est-ce sous cette forme qu'on la retrouve au bout d'un temps plus ou moins long.

La chaux est transportée sur le lieu même à l'état de chaux vive. Elle s'emploie de diverses manières. Assez souvent on la dispose de place en place par petits tas et on l'abandonne ainsi pendant deux à trois semaines. On la régale ensuite sur le champ et on l'incorpore à la terre au moyen d'un faible labour. Cette façon d'opérer est connue sous le nom de méthode italienne.

D'autres fois, on forme, avec la chaux et des produits boueux, des composts que l'on emploie après plusieurs mois d'exposition en plein air : c'est la méthode française.

Le volume de chaux que nécessite une terre dépend de la nature de cette terre. Il varie de 20 à 200 hectolitres par hectare. On peut considérer qu'une dépense de 30 hectolitres à l'hectare par période quinquennale représente une moyenne souvent adoptée.

La chaux joue un rôle multiple. Elle rend consistantes les terres sablonneuses dont elle agglomère les particules. Elle donne de la légèreté aux sols compacts et argileux qu'elle rend poreux, ce qui facilite l'accès de l'air. Dans ce cas, elle coagule l'argile délayée par les eaux pluviales.

En outre de ce rôle essentiellement physique, la chaux exerce un rôle chimique important. Elle rend assimilables les substances organiques que les végétaux ne pourraient absorber directement et favorise la nitrification. Son emploi est tout indiqué dans les sols tourbeux et humifères où elle rend les meilleurs services.

La chaux que l'on veut employer ne doit pas contenir d'incuits en proportion notable.

La chaux éteinte provenant de la fabrication du gaz d'éclairage contient des sels de calcium ; elle forme un bon amendement calcaire.

Les chaulages se font à l'automne.

Plâtrage. — Le gypse ou pierre à plâtre est du sulfate de calcium hydraté. On l'emploie aussi bien à l'état cuit qu'à l'état cru. On le répand sur le sol à raison de 300 kilogrammes environ par hectare. Il donne un meilleur rendement en légumineuses. Il sert aussi à fabriquer des composts.

D'après M. Dehérain, la potasse que l'on constate dans les couches superficielles des terres passe dans les couches inférieures à l'état de sulfate de potassium, grâce à une double décomposition en présence du plâtre; ce sulfate se trouve alors en contact avec les racines des plantes, d'où sa facile absorption.

A défaut de plâtre, on se sert au voisinage des agglomérations importantes des plâtras résultant de la démolition des maisons [1].

Amendements divers. — On conçoit aisément qu'en outre des amendements précédents il en existe d'autres qui trouvent aussi leur emploi du moment qu'ils possèdent en quantité suffisante des éléments nutritifs assimilables.

Parmi eux, on doit citer les cendres de combustibles. Celles-ci sont de deux sortes : les cendres des combustibles végétaux et les cendres des combustibles minéraux. Les premières sont plus souvent utilisées que les secondes, car elles renferment, en général, plus de principes utiles à la végétation des plantes. Elles contiennent souvent un grand nombre de bases et d'acides. Les bases sont : les alcalis, la chaux, la magnésie, l'alumine, les oxydes de fer et de manganèse. Les acides sont : les acides phosphorique, silicique, carbonique et sulfurique. On rencontre aussi des chlorures, quelquefois des iodures, des bromures, rarement des arséniates. Les cendres minérales ont une composition com-

1. Voir au chapitre XX, *Plâtres*, les analyses de plâtres de diverses provenances.

plexe et variable. Les cendres de foyers domestiques ont peu d'escarbilles et sont plus ou moins mélangées à des cendres de bois. Si elles proviennent des établissements métallurgiques, elles sont agglomérées, elles ont des parties vitrifiées et contiennent des petits morceaux de coke; elles sont exemptes de substances alcalines. Elles sont d'ailleurs hétérogènes et renferment assez fréquemment du sable, de l'argile, de l'oxyde ferrique, des silicates d'aluminium, de fer et de calcium, de la chaux caustique, du carbonate et du sulfate de calcium, des phosphates et des arséniates. Pour remédier à l'hétérogénéité de tels produits, il faut les pulvériser et les mélanger un grand nombre de fois avant leur emploi.

Dans certaines régions où l'industrie sucrière a un développement considérable, comme le Nord de la France par exemple, il n'est pas rare d'amender les terres au moyen du résidu provenant de la carbonatation de la chaux, obtenu au moment de la défécation. Ce résidu contient 30 à 45 0/0 de calcaire, un peu d'azote, 2 0/0 d'acide phosphorique et une quantité relativement considérable de matières organiques; il constitue l'*écume de défécation*.

Écobuage. — Par ce procédé, on modifie la couche superficielle de la terre en enlevant les végétaux et les insectes nuisibles. On emploie pour cela une houe tranchante. Les plaques enlevées sont retournées; on les fait sécher au soleil pendant la saison d'été. Après dessiccation, on en forme des tas auxquels on met le feu. Les cendres sont mélangées avec de l'argile cuite et répandues sur la terre.

Ce système est très employé dans le Midi de la France, en Algérie et en Tunisie.

Il est, toutefois, permis de se demander si le résultat obtenu est en rapport avec le travail occasionné. En tout cas, ce procédé s'emploie plutôt dans les terrains argileux et tourbeux et ne doit pas être renouvelé trop fréquemment aux mêmes endroits. Il convient, par contre, aux légumineuses et aux arbres forestiers, car il a l'avantage de détruire les insectes nuisibles.

ANALYSE CHIMIQUE

D'après ce qui précède, on voit que l'amendement doit être différent pour chaque nature du sol. La connaissance de la composition chimique de chaque espèce d'amendement devient dès lors indispensable si l'on veut se mettre à l'abri des mécomptes ultérieurs.

Marne. — L'examen physique est insuffisant pour être renseigné sur la valeur d'une marne.

L'analyse chimique ordinaire fait connaître la proportion des corps suivants : résidu insoluble, alumine et oxyde ferrique, chaux, magnésie, perte au feu. Ces éléments se déterminent par les procédés employés dans l'analyse des calcaires [1]. Il est utile en outre de connaître les teneurs en anhydride phosphorique, en potasse et en azote. Ces dosages s'effectuent de la façon suivante :

Anhydride phosphorique. — On attaque l'échantillon par l'acide chlorhydrique, on évapore à sec. On reprend le résidu par de l'eau acidulée ; on filtre pour séparer la silice insoluble. Dans la liqueur filtrée on précipite l'alumine, l'oxyde ferrique et l'acide phosphorique par l'ammoniaque. Le précipité chauffé au rouge avec du sulfate de sodium donne du phosphate de sodium que l'on transforme en pyrophosphate de magnésium.

Potasse. — La matière est portée à l'ébullition avec de l'eau de baryte. On filtre. La liqueur filtrée est traitée par un courant de gaz carbonique qui sature la baryte et les alcalis libres. On porte à nouveau à l'ébullition. On ajoute un excès d'acide chlorhydrique, on concentre la liqueur, à laquelle on ajoute du tétrachlorure de platine. On évapore lentement, on ajoute de l'alcool éthéré qui dissout le chloroplatinate de sodium et laisse insoluble le chloroplatinate de potassium. On filtre. On pèse le chloroplatinate de potassium, ce qui permet de connaître la teneur en potasse.

1. Voir chap. XIII, *Pierres naturelles ; calcaires* (*analyse chimique*).

Azote. — Sur une grille à analyse, on chauffe un mélange de marne et de chaux sodée. L'azote se transforme en ammoniaque qui se rend dans une solution titrée d'acide sulfurique qu'elle neutralise en partie; on détermine avec une autre liqueur titrée alcaline la quantité d'acide neutralisée, ce qui permet d'en déduire la dose d'ammoniaque et, par suite, celle d'azote qui s'est dégagée.

Si l'on a une matière dont l'origine est connue de l'agriculteur ou qui est présentée comme ayant déjà donné des résultats satisfaisants, on peut se dispenser d'effectuer une analyse complète ; on se contente alors de déterminer la teneur en calcaire au moyen d'un calcimètre.

Dans une marne, il peut y avoir intérêt à connaître la proportion de parties actives ; pour cela, on a recours à la lévigation sur 1 ou 2 kilogrammes de matière. De cette façon, on sépare le sable et les noyaux calcaires qui restent au fond du vase dans lequel on opère. Cette portion constitue les parties inertes de la marne.

On recueille, d'autre part, les matières en suspension contenues dans les eaux décantées; on les sèche. Leur poids représente la partie utile de l'amendement. Plus ce poids est considérable, plus la valeur du produit est élevée.

Chaux. — L'analyse d'une chaux fournit les teneurs en silice, alumine et oxyde ferrique, chaux, magnésie, anhydride sulfurique et perte au feu.

Les procédés de dosage de ces éléments sont indiqués au chapitre XIX.

Plâtre. — L'analyse du plâtre cuit ou cru doit être faite sur le produit prêt à être mis en œuvre. Les éléments les plus utiles à doser sont : le carbonate et le sulfate de calcium, le sable, l'argile et l'oxyde ferrique.

La perte au feu ne comprend pas seulement l'anhydride carbonique et l'eau, car il y a, pendant la calcination, décomposition partielle du sulfate de calcium par le sable et l'argile. Néanmoins, malgré l'erreur produite, on peut considérer comme suffisante en pratique l'estimation des deux éléments (CO^2 et H^2O) comme constituant la perte au feu.

Cendres et écumes de défécation. — L'analyse des cendres de combustibles est généralement assez longue. Elle ne peut être faite que dans un laboratoire, car elle nécessite quelquefois la recherche qualitative préalable d'éléments très divers qui peuvent exercer une action réelle sur le développement et la nutrition des plantes. Il en est de même des écumes de défécation.

II. — TERRES

On donne le nom de *terre arable* ou de *terre végétale* au dépôt inconsistant, de faible épaisseur, recouvrant l'écorce terrestre et servant de nourriture et de support aux végétaux. Certaines contrées en sont complètement dépourvues. On ne rencontre, en effet, dans le désert du Sahara par exemple, que des sables arides provenant de la désagrégation du sous-sol. A Aden, le manque d'eau indispensable à un sol composé en grande partie de roches volcaniques empêche la végétation de se donner un libre essor.

On admet que la terre arable a pris naissance avec les lichens et les mousses, qui auraient emprunté aux déjections volcaniques les matières minérales dont elles sont formées, et à l'air et aux eaux pluviales l'azote et le carbone. Des amas de lichens et de mousses auraient ainsi constitué une première réserve organique du sol sur lequel se seraient ensuite développés des végétaux d'ordre supérieur. L'œuvre commencée par les premiers se serait alors ainsi continuée. L'air, la pluie, des infiltrations souterraines, y joignaient leur action par l'apport de principes fertilisants. Enfin la destruction des plantes donnait lieu à des composés noirs complexes que l'on désigne sous le nom d'*humus*.

Les transformations successives subies par ces éléments sont dues, en outre, à des actions secondaires, parmi lesquelles il faut citer celles provenant d'animaux microscopiques, dont certains transforment les débris végétaux en substances solubles, facilement assimilables par les plantes, et d'autres oxydent les déchets putréfiés des matières azotées

pour les amener à l'état de nitrate de potassium. Les vers de terre concourent aussi à cette lente modification du sol. Ils ingèrent une grande quantité de matières diverses, légumes, graines, petits fragments de feuilles, etc. Toutes ces substances, triturées, digérées, subissent des transformations chimiques, et les déjections qui en résultent, ramenées à la surface du sol, forment l'humus. On juge de l'importance du travail opéré si on s'en rapporte à l'opinion de Saurin, qui dit qu'en dix ans six vers suffisent à ramener au-dessus du sol, sur un pied carré, une couche de 3 à 6 centimètres d'humus, et aux observations d'Hensen, qui estime à 133.000 le nombre des annelés contenus dans un hectare de jardin et à 300.000 le nombre de ceux vivant dans un hectare de forêt.

Souvent cette terre arable n'occupe que quelques décimètres au plus d'épaisseur. Cependant certaines contrées, comme la Russie méridionale, sont recouvertes de $0^m,50$ à $1^m,50$ de terre noire sur une étendue considérable (95.000.000 d'hectares). On constate également l'existence de cette terre en Hongrie et en Moldavie. Dans ces régions, la terre arable augmente de $0^m,025$ d'épaisseur par siècle.

Un sol végétal peut être classé, comme l'indique Wiley, dans l'une des catégories suivantes :

1° Terres formées sur place par la désagrégation des roches cristallines ou sédimentaires;

2° Terres dues au déplacement par l'eau des formations primitives (alluvions, dépôts lacustres, etc.);

3° Boues glaciaires (dues à l'action des glaciers);

4° Terres constituées par des cendres volcaniques ou des matériaux entraînés par le vent et déposés à des distances plus ou moins considérables (dunes littorales, dépôts éoliens en général);

5° Terres formées par la décomposition des matières végétales (terrains tourbeux, etc.).

Quoi qu'il en soit, la composition minéralogique d'une terre permet d'entrevoir quelles en seront les propriétés physiques. Quatre éléments essentiels, servant de nourriture aux plantes, se retrouvent toujours dans n'importe quel sol; ce sont : la silice, l'argile, le calcaire et les matières organiques (humus). Des éléments secondaires à l'état combiné,

l'acide phosphorique, la potasse, l'azote, viennent ajouter leur action à celle des premiers. Cependant leur poids ne dépasse guère 1 à 2 0/00 du poids total de la terre. Malgré leur faible proportion, ils sont indispensables au développement des végétaux.

On distingue aussi les terres en : *terres fortes* ou argileuses et *terres légères* ou sablonneuses.

Il existe naturellement entre ces deux divisions toute une série de terres appartenant à l'une et à l'autre catégorie. Aussi est-il d'usage de désigner les terres par une appellation multiple dont le premier terme indique l'élément prédominant. Exemple : terres argilo-siliceuses, sablo-calcaires, silico-argileuses, sablo-humifères, etc.

Parmi les propriétés physiques qu'il est utile de connaître, il faut citer la coloration, la densité, la facilité d'absorption.

Coloration. — Elle dépend souvent de sa richesse en oxyde de fer, en humus ou en calcaire.

Le sable et l'argile purs sont blancs. Le sol possède une teinte jaune lorsqu'il contient une certaine quantité d'oxyde de fer, et une teinte noire quand il y a de l'humus en proportion notable. On admet que la couleur noire est un indice de fertilité; les terres ainsi colorées sont souvent fortement azotées; elles sont riches en bactéries nitrifiantes quand la teneur en calcaire est assez grande.

Dans les terres blanches, le calcaire domine.

Densité. — La densité réelle d'une terre s'obtient par la méthode connue en physique sous le nom de méthode du flacon [1]. La densité apparente se détermine en pesant un litre de la matière.

On constate que fréquemment la densité réelle est à peu près le double de la densité apparente; elle oscille aux environs de 2,65. La densité d'un sol diminue avec sa richesse en humus.

Facilité d'absorption. — Le pouvoir absorbant est fonction de la couleur du sol et de sa chaleur spécifique. Les sols

1. Voir chapitre IX, *Densité des solides*.

riches en humus absorbent mieux les rayons calorifiques lumineux, ce qui se traduit par une précocité incontestable et une rapide maturité dans les récoltes.

Les terres argileuses très humides s'échauffent bien moins vite que les terres calcaires, celles-ci, plus perméables, abandonnant facilement leur eau, dont la chaleur spécifique est plus grande que celle du sol. Aussi ces terres sont-elles appelées *froides*.

Il y a quelquefois intérêt à connaître encore d'autres propriétés physiques : perméabilité du sol, porosité, absorption de l'eau dans une atmosphère humide saturée, vitesse d'écoulement de l'eau, capillarité, etc. Mais ces renseignements ne peuvent être fournis que par des laboratoires spécialement outillés pour ce genre d'expériences.

ANALYSE PHYSICO-MÉCANIQUE

Pour la terre arable, comme pour beaucoup de matières, il est de toute nécessité de se procurer un échantillon représentant exactement la moyenne du sol. On évite par conséquent de faire un prélèvement sur le bord d'une route ou d'un sentier, près des racines des arbres, dans des endroits délavés par des eaux de source ou de pluie, au voisinage des trous d'animaux rongeurs, et en général en tout lieu où, pour une raison quelconque, la terre a pu être modifiée d'une façon accidentelle.

Le prélèvement s'effectue en se servant d'une bêche avec laquelle on fait un trou d'environ 60 centimètres de profondeur, sur les côtés duquel on enlève une section de 10 centimètres d'épaisseur et d'une longueur de 20 à 30 centimètres. Cette opération est répétée en plusieurs endroits, et les tas qui en proviennent sont réunis en un seul que l'on brasse bien et sur lequel on prélève 1 ou 2 kilogrammes de matière.

L'échantillon est abandonné à lui-même pendant quelques jours.

Sur cette prise, on sépare les éléments par ordre de gros-

seur au moyen de trois tamis spéciaux dont les mailles sont espacées de 5, 3 et 1 millimètre. On a quatre lots ainsi composés :

Premier lot : Fragments restant sur le tamis de 5 millimètres : *cailloux;*

Deuxième lot : Terre passant au tamis de 5 millimètres et retenue par celui de 3 millimètres : *petits cailloux;*

Troisième lot : Terre passant au tamis de 3 millimètres et retenue par celui de 1 millimètre : *terre moyenne;*

Quatrième lot : Terre passant au tamis de 1 millimètre : terre fine.

On ne s'occupe que du quatrième lot, c'est-à-dire de la terre fine, constituant véritablement la terre arable. On sèche 10 grammes de ce lot dans une étuve dont la température est de 100 à 110° C. La différence entre la pesée initiale et la pesée finale donne le poids de l'*eau hygrométrique.*

On fait ensuite une autre prise de 10 grammes que l'on humecte d'un peu d'eau distillée dans une capsule, de manière à en former une pâte. On ajoute 15 centimètres cubes d'eau distillée. Puis on frotte la terre avec le doigt contre les bords de la capsule jusqu'à ce que l'on obtienne un délayage suffisant. On laisse reposer dix secondes, on décante dans un verre à pied, on ajoute de l'eau distillée, on laisse reposer à nouveau dix secondes, on décante encore et on répète l'opération jusqu'à ce que le liquide reste absolument limpide.

Le produit de la décantation se compose de sable fin et d'argile. Ce qui reste de la capsule constitue le sable moyen. La capsule est portée à 100°, puis pesée. La différence entre ce poids et le poids primitif de la capsule donne les parties fines de la terre arable.

On effectue la séparation du sable et de l'argile au moyen d'appareils spéciaux connus sous le nom d'*élutriateurs*. Parmi ceux-ci, les appareils Schülze et Schöne, souvent employés, sont décrits à propos de l'analyse des argiles.

Dosage du calcaire. — La proportion du carbonate de calcium est donnée, en général, par la seule détermination de l'acide carbonique. Il suffit donc de doser ce gaz. C'est ce qui se fait avec facilité avec le calcimètre.

Le calcimètre Bernard (*fig.* 87) se compose d'une fiole conique B, dans laquelle on introduit 1 gramme de la terre à doser et un petit tube à essai contenant de l'acide chlorhydrique étendu. Ce flacon est fermé par un bouchon percé d'un trou par lequel passe un tube communiquant avec la partie supérieure d'un gros tube mesureur en verre D, divisé en 100 parties égales. Ce mesureur est relié lui-même par sa partie inférieure à une ampoule A suspendue à un crochet. Il est rempli d'eau de façon que le liquide dépasse légèrement le zéro de la graduation. On enfonce progressivement le bouchon du flacon B et l'on s'arrête quand le niveau affleure exactement le zéro du mesureur. Puis, saisissant l'ampoule de la main gauche et le flacon de la main droite, on incline ce dernier; le liquide se répand dans le vase et détermine une attaque de la terre qui y est contenue. Il se produit un dégagement de gaz carbonique qui provoque un refoulement de l'eau dans la partie inférieure du mesureur. Quand toute réaction a cessé, on lit la division à laquelle s'arrête le niveau de l'eau, 60 centimètres cubes par exemple. On multiplie ce chiffre par 0,4 pour avoir la teneur en carbonate de calcium. Dans le cas précité, on a $60 \times 0{,}4 = 24$ 0/0 de carbonate de calcium.

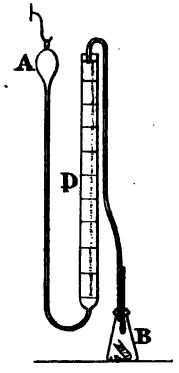

FIG. 87.— Calcimètre Bernard.

Le bouchon du flacon B est en outre traversé par un thermomètre plongeant dans le vase et donnant la température intérieure de celui-ci. Pour éviter toute correction, on s'arrange de telle sorte que cette température soit comprise entre 16° et 22°.

Si la terre est très calcaire, il suffit de faire une prise d'échantillon de $0^{gr},5$. Si elle est peu attaquable par les acides, il est utile d'en prendre 5 grammes. Ces pesées sont faites avec la balance de précision.

On peut aussi employer le calcimètre de Scheibler, qui se compose d'un vase F contenant la marne en poudre et un petit tube *t* dans lequel se trouve une quantité suffisante

d'acide chlorhydrique (*fig.* 88). Ce vase communique avec une vessie en caoutchouc *v* renfermée dans un flacon A qui est relié à un tube mesureur M. Ce mesureur est lui-même en communication avec un autre tube D. Ces deux tubes sont remplis d'eau jusqu'au trait marqué 0.

Pour faire une détermination, on vérifie d'abord le bon fonctionnement de l'appareil, puis on fait couler le liquide sur la marne expérimentée. Il y a dégagement de gaz carbonique, gonflement de la vessie et abaissement du niveau de l'eau dans le mesureur. On fait alors écouler une certaine quantité d'eau dans le vase B (au moyen de la pince *p*) de manière à amener les niveaux des liquides des deux tubes à se trouver dans un même plan horizontal. La différence de hauteur entre le niveau primitif 0 et le niveau final dans le tube mesureur correspond au volume d'anhydride carbonique dégagé. Connaissant cette quantité d'anhydride, il est facile d'en déduire la teneur en carbonate de calcium.

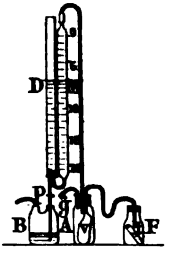

Fig. 88. — Calcimètre Scheibler.

Il existe d'autres modèles de calcimètres tels que ceux de Sidersky et de Houdaille. Ces appareils sont également recommandables.

ANALYSE CHIMIQUE

L'analyse chimique d'une terre permet, par les résultats qu'elle fournit, de savoir comment il convient de modifier les proportions de différentes matières pour atteindre un but cultural déterminé.

La connaissance des matières fertilisantes : calcaire, acide phosphorique, azote, potasse, est une condition nécessaire et quelquefois suffisante pour un agriculteur.

ANALYSE SOMMAIRE

Réaction du sol. — Elle est alcaline ou acide. On constate cette réaction au moyen du papier de tournesol que l'on plonge dans de l'eau tenant en suspension un poids de terre équivalent. Dans la majorité des cas les sols sont neutres au tournesol.

Eau hygrométrique. — Elle se détermine par la différence entre deux pesées successives faites sur un poids de 10 grammes de matière soumise dans une étuve à la température de 105°.

Perte au feu (ou perte au rouge). — On la dose en portant au rouge sombre 5 grammes de terre. Elle comprend l'eau, les matières organiques, et quelquefois l'acide carbonique provenant de la décomposition du calcaire contenu dans les terres.

Humus. — 10 grammes de terre sont introduits dans un filtre. On verse de l'acide chlorhydrique étendu, ce qui a pour effet de dissoudre la chaux et la magnésie, qui diminuent la solubilité de l'humus dans l'ammoniaque.

On traite ensuite par l'ammoniaque étendue. L'humus se dissout. La liqueur est évaporée à sec dans une capsule tarée. Du poids trouvé on déduit celui résultant de la calcination de la capsule et qui forme la silice soluble ; on a ainsi le poids de l'humus.

Calcaire. — Il se dose avec une exactitude suffisante dans la pratique par l'emploi du calcimètre. Cependant, s'il y avait du carbonate de magnésium, on aurait un chiffre trop élevé, puisqu'on attribuerait la totalité du gaz carbonique à une quantité correspondante de chaux, sans s'occuper de la magnésie. Mais, en général, les terres ordinaires contiennent trop peu de magnésie pour qu'il soit besoin d'en tenir compte dans le résultat trouvé.

ANALYSE COMPLÈTE

Résidu insoluble dans les acides. — On pèse 5 grammes de terre que l'on fait digérer avec de l'acide chlorhydrique à une douce chaleur. On filtre. Le contenu du filtre constitue le résidu insoluble.

Alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie. — Dans la liqueur filtrée précédente on dose ces éléments en suivant la marche qui sera indiquée à propos de l'analyse des chaux et ciments.

Alcalis. — Pour le dosage de la potasse et de la soude, il convient d'opérer sur une prise spéciale, par exemple 2 grammes de l'échantillon. On traite la matière, comme il est dit précédemment, par l'acide chlorhydrique, on élimine le résidu insoluble par filtration. La liqueur filtrée est additionnée d'un léger excès de chlorure de baryum et d'ammoniaque. Il y a précipitation du fer, de l'alumine, de l'acide sulfurique et de l'acide phosphorique. On filtre ; on précipite ensuite dans la liqueur filtrée la chaux et la baryte en excès par l'oxalate d'ammonium. On évapore à sec la nouvelle liqueur filtrée, puis on chauffe au rouge sombre pour amener la décomposition des oxalates et provoquer le dégagement des sels ammoniacaux.

Le résidu est formé de magnésie, de potasse et de soude. On verse 30 centimètres cubes d'eau ; on filtre. Le carbonate de magnésium, en grande partie insoluble, reste sur le filtre. On ajoute au liquide filtré un peu d'eau de baryte. On laisse digérer pendant quelque temps pour éliminer les dernières traces de magnésie. On précipite enfin l'excès de baryte par le carbonate d'ammonium, on évapore, puis on calcine au rouge la liqueur filtrée. L'augmentation du poids de la capsule dans laquelle on opère donne le poids des chlorures de potassium et de sodium, ce qui permet de calculer la proportion des alcalis.

Analyse du résidu insoluble. — Le résidu, souvent important (80 à 90 0/0), déterminé comme il a été dit plus haut, se compose de divers éléments, parmi lesquels se trouvent la silice sous forme de quartz, les silicates de fer, d'aluminium, de calcium, de magnésium, de potassium et de sodium. Ces composés sont restés intacts.

Pour faire l'analyse d'un semblable résidu, on fond celui-ci dans un creuset de platine avec un mélange de carbonates alcalins, et on élève progressivement la température jusqu'au rouge blanc. On laisse ainsi vingt minutes à la chaleur de la fusion tranquille. On reprend ensuite la masse refroidie par l'eau. On évapore à sec cette matière, on ajoute de l'eau acidulée et on filtre pour obtenir la silice insoluble. On recommence alors sur la liqueur filtrée la série des opérations précédentes, en opérant de la même façon, pour déterminer l'alumine, l'oxyde ferrique, la chaux et la magnésie. Pour le dosage de la potasse et de la soude il faut naturellement éviter l'emploi de carbonates alcalins; on remplace ceux-ci par de l'hydrate de baryum ou du fluorure d'ammonium.

Azote (ammoniacal et organique). — On emploie souvent le procédé *à la chaux sodée*, dont voici le *modus operandi :* dans

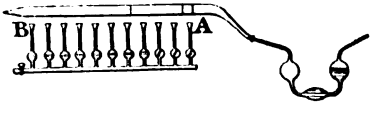

Fig. 89. — Appareil pour déterminer l'azote ammoniacal et organique (terres).

un tube de verre de 50 centimètres de longueur, étiré en pointe fine à l'une de ses extrémités (*fig.* 89), on introduit successivement un peu d'oxalate de calcium, de la chaux sodée (sur $0^m,05$ de longueur), un mélange de 10 grammes de terre fine et de chaux sodée (sur 20 centimètres) et encore un peu de chaux sodée. On maintient le tout par un tampon d'amiante peu serré. On étire ensuite à la flamme

l'extrémité du tube. On entoure la partie cylindrique d'une bande de clinquant destinée à répartir la chaleur. L'extrémité du tube de verre est mise en communication par un tube de caoutchouc avec un appareil à boules de Will et Warentrapp ou avec une fiole contenant une solution d'acide sulfurique titrée. On chauffe progressivement le tube de verre en commençant par son extrémité ouverte, c'est-à-dire par le côté A. On continue ensuite à chauffer peu à peu les autres parties de façon à arriver jusqu'en B. Le dégagement ne doit pas être trop rapide.

Pour chasser les traces d'ammoniaque qui restent dans le tube, on élève la température au point B où se trouve l'oxalate de calcium. La décomposition de ce sel donne naissance à un courant d'anhydride carbonique qui balaye le gaz ammoniac. On peut encore réunir l'appareil à boules ou le flacon qui le remplace à un aspirateur qui ramène le gaz dans le récipient.

La liqueur du tube de Will et Warentrapp est ensuite versée dans un ballon à fond plat, puis on détermine à l'aide d'une solution titrée de soude la quantité d'acide sulfurique neutralisée par l'ammoniaque. Un calcul très simple donne la quantité d'ammoniaque et par suite celle d'azote (ammoniacal et organique) contenue dans l'échantillon.

Anhydride phosphorique. — On opère généralement sur 20 grammes de matière. On dose cet élément à l'état de phosphomolybdate d'ammonium ou à l'état de pyrophosphate de magnésium.

Dans le premier cas on a soin d'insolubiliser la silice avant d'ajouter la solution nitromolybdique, sans quoi il y aurait, outre le précipité le phosphomolybdate, un deuxième précipité de silicomolybdate d'ammonium.

Dans le second cas on transforme, par la voie sèche, l'acide phosphorique en phosphate de sodium au moyen du sulfate de sodium. La dissolution filtrée du phosphate est additionnée ensuite de mixture magnésienne, ce qui donne un précipité de phosphate ammoniaco-magnésien qui produit, par la calcination, du pyrophosphate de magnésium.

Séparation de la potasse et de la soude. — On a vu plus haut comment on déterminait les alcalis.

Pour doser la potasse, on reprend par un peu d'eau les résidus de chlorures de potassium et de sodium obtenus. On y ajoute un excès de tétrachlorure de platine. On évapore ensuite à sec. On reprend par l'alcool éthéré, jusqu'à ce que le lavage ne donne plus de coloration jaune. Le chloroplatinate de potassium insoluble est redissous sur le filtre au moyen de l'eau bouillante. On le recueille dans une capsule dans laquelle on ajoute du formiate de sodium; on chauffe. Le chloroplatinate est réduit. On recueille, on dessèche et on pèse le platine; ce poids multiplié par 0,48 donne la potasse contenue dans l'échantillon.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

La silice soluble, que l'on rencontre dans les terres, provient de l'action de l'eau chargée de gaz carbonique sur les minéraux à base de feldspath. Elle peut être absorbée par les radicelles végétales, et se retrouve dans certains organes de la plante. On sait, par exemple, que la paille d'avoine contient 40 0/0 de silice et celle de froment 67 0/0.

Elle constitue un des principaux éléments des terres végétales. Une teneur de 60 à 70 0/0 donne une terre légère, perméable, se laissant facilement traverser par les eaux. Un semblable sol se recouvre volontiers de châtaigniers, de bruyère, de digitale, etc.

L'argile fournit une terre molle, adhérant aux outils aratoires par les temps humides. Sèche, elle présente, au contraire, beaucoup de dureté. Elle forme le caractère distinctif des terres fortes. Elle retient jusqu'à 70 0/0 de son poids d'eau et rend le sol humide (terres froides) en raison de son peu de perméabilité.

Le sable ne conserve que peu d'eau (15 à 30 0/0), qu'il cède d'ailleurs facilement.

Les sols calcaires retenant moins facilement l'eau que les sols argileux, il s'y produit une plus forte élévation de tem-

pérature pour une même quantité de chaleur absorbée, et par conséquent une précocité dans les récoltes.

Lorsque le dosage décèle une quantité importante d'eau hygrométrique, on a généralement affaire à un sol médiocre. Certaines terres noires des marais du nord de la Charente-Inférieure sont dans ce cas. Elles contiennent la moitié de leur poids en eau et le tiers en matières volatiles et combustibles. Elles sont en outre presque entièrement dépourvues d'argile et renferment très peu de carbonate de calcium. De pareilles terres ne peuvent évidemment offrir aucun support convenable aux végétaux, dont les racines ne sont pas maintenues par une substance résistante. C'est pourquoi il n'est pas rare d'y constater la verse des blés. Ces genres de sols doivent recevoir un amendement argileux ou calcaire, seul moyen naturel pour les rendre propres à la culture.

L'addition de calcaire est avantageuse dans les terrains argilo-siliceux ; il leur donne de la perméabilité en les empêchant de se fendiller par la sécheresse. Le calcaire peut aussi provoquer une décomposition rapide des engrais organiques.

L'humus est généralement très riche en azote ; des terres noires russes en contiennent jusqu'à 8 0/0. Sa constitution chimique est mal définie ; on y trouve des composés de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, de potassium, de sodium, de calcium, des acides ulmique, humique, crénique. Il communique au sol de la légèreté et de la perméabilité ; les racines s'y développent aisément. Il retient facilement l'humidité. Une teneur supérieure à 15 0/0 devient cependant excessive et rend le sol tourbeux.

Les recherches de M. Dehérain ont montré qu'un travail intensif du sol augmente considérablement l'assimilation de l'azote et les phénomènes de nitrification.

Pour qu'une terre soit dans des conditions de fertilité moyenne, il faut qu'elle contienne au moins :

	0/0
Azote	0,1
Anhydride phosphorique	0,1
Potasse assimilable	0,2

La terre des prairies et le terreau des fleuristes renferment de 0,4 à 0,9 0/0 d'azote.

La teneur d'un sol en anhydride phosphorique varie en général de 0,05 à 0,5 0/0. Cependant des roches granitiques souvent pauvres en cet élément n'en renferment quelquefois que 0,02 0/0. Les terres d'Auvergne provenant de la décomposition de roches volcaniques ont fréquemment une teneur de 0,25 à 0,32 0/0. Les limons du Pas-de-Calais et du Nord ne contiennent guère que 0,08 à 0,17 0/0 de ce composé métalloïdique.

M. de Gasparin a proposé une classification artificielle basée sur la richesse des terres en anhydride phosphorique. C'est ainsi qu'il distingue :

Les terres pauvres ayant une teneur en anhydride phosphorique inférieure à	0,0005
Les terres de richesse moyenne ayant une teneur en anhydride phosphorique comprise entre	0,0005 et 0,001
Les terres riches ayant une teneur en anhydride phosphorique comprise entre	0,001 et 0,002
Les terres très riches ayant une teneur en anhydride phosphorique supérieure à	0,002

En ce qui concerne la potasse, la partie soluble dans l'eau régale varie de 0,1 à 0,2 0/0. Elle est peu considérable dans les sols calcaires ; elle est plus élevée dans les terres argileuses. Elle est indispensable aux plantes, tandis que la soude n'est pas nécessaire à leur nutrition.

D'après les essais faits sur des légumineuses par M. Schneidewind, le carbonate de magnésium a une action préférable à celle qu'exerce le sulfate de magnésium ; de plus, il peut partiellement remplacer le carbonate de calcium. Par l'emploi simultané de sels de potassium et de marnes dolomitiques, on introduit d'ailleurs dans le sol des quantités notables de magnésie dont l'influence bienfaisante est incontestable.

Voici quelques analyses qui montrent la variation de composition des terres d'un même pays.

ÉLÉMENTS DOSÉS	TERRES D'ALGÉRIE N° 1	TERRES D'ALGÉRIE N° 2	TERRES DE POLOGNE (rives de la Vistule) N° 1	TERRES DE POLOGNE (rives de la Vistule) N° 2	TERRES DU PORTUGAL (province d'Aveiro) N° 1	TERRES DU PORTUGAL (province d'Aveiro) N° 2	TERRES D'ÉGYPTE (cultivée) N° 1	TERRES D'ÉGYPTE (inculte) N° 2	TERRES D'ESPAGNE
Produits volatils ou combustibles :									
Eau hygrométrique.	4,95	6,00	0,95	1,75	21,42	4,24	4,80	8,05	1,40
Azote	0,14	0,17	0,14	0,16	0,24	0,06	0,06	0,06	0,09
Autres produits	9,58	14,50	3,98	4,09	»	»	2,34	3,49	1,46
	14,67	20,67	5,07	6,00	21,66	4,30	7,20	11,60	2,95
Matières minérales :									
Résidu insoluble dans les acides	57,50	52,75	89,04	86,67	65,35	92,05	58,97	48,66	87,06
Alumine et oxyde ferrique	4,80	4,60	3,09	4,75	11,45	2,50	13,04	22,45	6,24
Chaux	11,10	12,90	0,81	0,75	0,35	0,30	9,88	5,18	0,19
Magnésie	»	»	0,38	0,42	0,80	0,25	0,14	0,93	0,48
Anhydride phosphorique	0,30	0,10	»	»	0,08	0,02	0,19	0,13	»
Potasse	0,45	1,05	»	»	0,02	traces	1,53	1,77	1,28
Soude			»	»	0,10	0,06	1,76	1,41	0,57
Chlore	0,10	0,50	»	»	0,04	0,02	»	»	»
Anhydride sulfurique	0,05	0,90	»	»	0,15	0,50	»	»	»
Produits non dosés.	11,03	6,53	1,61	1,41	»	»	7,29	7,87	1,23
	85,33	79,33	94,93	94,00	78,34	95,70	92,80	88,40	97,05
TOTAUX	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Dans des sols de constitution différente, la plus belle récolte ne correspond pas toujours à ceux qui sont les plus riches en azote, en anhydride phosphorique ou en potasse. Un terrain à grosses particules est moins attaquable par les racines qu'un sol très divisé. Plus les particules du sol sont ténues, plus elles offrent de points de contact aux poils radicaux, et plus facilement aussi ceux-ci rencontrent les éléments nutritifs.

La méthode d'examen bactériologique est quelquefois appliquée à l'art cultural. Une terre riche en humus renferme bien plus de bactéries qu'une terre pauvre. Une graine ensemencée dans une terre stérilisée donne naissance à une plante aussi grêle que si elle s'était développée dans l'eau pure.

Au fur et à mesure que l'on pénètre plus avant dans le sol, le nombre des infiniment petits diminue, puis devient nul. Des couches successives de terrain, prises au même endroit d'un champ, ont donné à l'examen microbiologique, effectué par Reimers, les résultats suivants :

	Germes par cm³
Terre recueillie à la surface du champ.....	2.564.800
— prise à 2m,00 de profondeur (argile)...	23.100
— — 3m,50 — (gravier)..	6.170
— — 4m,50 — (sable)...	1.580
— — 6m,00 — (grès)....	0

III. — SABLES

Le sable, auquel on n'attachait autrefois qu'une importance secondaire au point de vue de son emploi dans les constructions, a pris une importance beaucoup plus grande lorsqu'on s'est aperçu que de la finesse de ses grains et de sa nature dépendait la bonne ou la mauvaise qualité des mortiers avec lesquels il était confectionné.

On désigne sous le nom de *sables* les produits de la désagrégation de roches diverses ; leur composition chimique est semblable, mais leur composition minéralogique est souvent

différente. Les éléments chimiques que l'on rencontre d'une façon courante dans les sables sont les suivants : silice, alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie, eau, anhydride carbonique. A ces corps viennent s'ajouter parfois d'autres substances, telles que le manganèse, la potasse, la soude, l'anhydride phosphorique, l'azote, les matières organiques, etc. Au point de vue minéralogique, on peut y trouver du silex, du quartz, du feldspath, du calcaire, de l'argile, des matières terreuses, etc. Les sables les plus répandus sont de nature quartzeuse.

Les sables résultent de l'action destructive que les rivières et les torrents exercent sur les roches en général. Les fragments désagrégés emportés par les courants se frottent continuellement les uns contre les autres, ce qui détermine leur usure assez rapide. Les morceaux les plus gros et les plus lourds ne sont pas entraînés bien loin : ils constituent les galets ou les cailloux. Les morceaux de plus petite dimension vont se déposer à une distance plus éloignée et forment les graviers. Enfin, les parties fines en suspension dans l'eau en mouvement se déposent dans les parties des cours d'eau où le régime n'est pas troublé; ce sont les alluvions constituées par les sables.

Dans ces diverses pérégrinations, il se passe pour ces matériaux ce que l'on observe dans le règne végétal et dans le règne animal; le plus fort l'emporte sur le plus faible. Ici, c'est le minéral le plus dur, le silex, qui résiste le mieux à l'usure ; il réduit le calcaire, l'argile et les matières organiques à l'état de poudre impalpable. Aussi dans les alluvions n'est-il pas étonnant de rencontrer le silex en proportion notable. Quant aux parties tendres, elles se retrouvent en beaucoup d'endroits à l'état de vase ou de boue. Quelquefois même, si le courant est intense, cette boue mélangée de sable fin est entraînée jusqu'à l'embouchure des fleuves et des rivières.

Le sable quartzeux pur est d'une belle couleur blanche. Souvent l'argile lui communique une teinte terreuse, et l'oxyde ferrique une couleur jaune. Les grains qui le composent sont anguleux; quelquefois cependant ils affectent une forme sphérique. On y rencontre fréquemment du mica en paillettes, dont l'éclat argentin est du plus bel aspect sous

le reflet du soleil. Le sable quartzeux est assez souvent mélangé de calcaire.

Les arènes que l'on trouve en amas de volume variable sont le résultat de l'altération de roches anciennes (roches arénacées, feldspathiques et argileuses) sous l'influence de l'humidité de l'air. Le quartz s'y reconnaît par l'aspect vitreux de grains arrondis et isolés, le mica par son éclat brillant, et le feldspath par son état spécial différent de celui qu'il présente dans la roche, car il est opaque, terne et peu consistant au lieu d'être miroitant et compact.

La couleur des arènes varie du rouge brun au jaune. On les rencontre en masses abondantes à la séparation des terrains anciens et secondaires, particulièrement dans le Périgord et en Champagne.

Elles occupent la plupart du temps le sommet de collines peu élevées. Elles se distinguent des sables argileux ou limoneux à cause d'une propriété pouzzolanique indépendante de la cuisson résidant, d'après Vicat, dans la partie argileuse seule. Elles forment avec les chaux grasses des mortiers hydrauliques. Ce sont d'ailleurs des pouzzolanes naturelles peu énergiques.

Les *sables du Soissonnais* sont des sables fins formés de silice, de mica et de glauconie de couleurs très diverses. L'association de ces éléments donne des grès plus ou moins compacts. Quelques lits de faible épaisseur, composés de calcaire ou de glaise, sont interposés dans ces sables, parmi lesquels on voit encore des *têtes de chat*, qui sont des nodules de calcaire magnésien.

Les sables de la montagne de Reims ne contiennent pas de fossiles, ceux de la vallée de la Vesle en renferment quelques-uns ; en d'autres endroits on en trouve en grande quantité. Les sablières des environs de Pierrefonds possèdent des fossiles dans un état de conservation remarquable.

Sous la désignation de *sables de Beauchamp*, on comprend les sables qui s'étendent d'Epernay à la limite des départements de l'Eure et de la Seine-Inférieure. L'épaisseur de la couche sablonneuse est très variable dans le parcours. A l'arc de triomphe de l'Etoile, elle est de 11 mètres, tandis

qu'elle atteint 30 mètres près de Beaumont. Ces sables sont siliceux, plus rarement argileux. Leur couleur n'est pas toujours identique ; elle est tantôt blanche, tantôt verte. On y rencontre quelquefois des fossiles marins. Ces natures de sables apportent parfois des entraves sérieuses à l'exécution des travaux, en raison de leur finesse et de leur extrême fluidité. On peut citer comme exemples les difficultés rencontrées dans la construction du tunnel de Chalifert (Seine-et-Oise) et dans celui de Nanteuil, près de la Ferté-sous-Jouarre. Quand les eaux viennent se réunir à ces sables et trouvent ensuite une issue à travers la voûte, il y a obstruction dans toute la largeur du souterrain, au point précis où l'accumulation s'est produite.

Le *sable vert* tire son nom de la couleur qui le caractérise ; cette coloration est due à la présence de grains de glauconie. Les rognons du sable vert des Ardennes renferment en outre du phosphate de calcium en proportion appréciable.

Les acides chlorhydrique, azotique et sulfurique, même à l'état concentré, sont inactifs à chaud et à froid sur les sables vitreux, c'est-à-dire sur ceux qui sont composés de silex et de quartz. Ils ont, au contraire, une action marquée sur les sables calcaires, avec lesquels ils déterminent une effervescence d'autant plus vive que la quantité de calcaire ou de débris coquilliers est plus considérable.

Certains sables contiennent des oxydes métalliques en quantité notable. Un moyen facile de le reconnaître consiste à porter la matière à une température élevée. La coloration due aux oxydes se manifeste alors très nettement.

La dureté relative des sables se classe dans l'ordre suivant : sables siliceux, basaltiques, quartzeux, granitiques, calcaires, volcaniques.

Au point de vue de leur provenance, les sables se rencontrent entre les couches sédimentaires, à la surface des roches éruptives désagrégées, dans les alluvions de rivières ou sur le rivage de la mer. Suivant le cas, ils prennent les noms de sables de mine, de carrière, de rivière ou de mer. Les sables de mer sont les plus répandus. On trouve aussi des sables fossiles, provenant de cataclysmes anciens, et des sables vierges ou arènes dont il a déjà été question. En géné-

ral, les sables fossiles ont leurs grains plus anguleux que ceux qui sont extraits de la mer ou des cours d'eau.

Le sable pur est blanc, mais il est souvent coloré par des oxydes métalliques ; il offre dans ce dernier cas une couleur grise, jaune, rouge ou verte.

Au point de vue chimique, les sables se divisent en deux grandes catégories : les sables calcaires et les sables siliceux. Les premiers proviennent de roches calcaires. Ils se dissolvent complètement dans les acides. Ils sont formés de grains mélangés de quartz. Les seconds sont le résultat de la désagrégation de roches siliceuses. Ils sont inattaquables par les acides. Ils se subdivisent en sables quartzeux formés de silice pure, en sables granitiques composés de feldspath et de mica, et en sables volcaniques formés de débris de roches volcaniques.

Comme ordre de préférence pour la construction, on doit choisir les sables siliceux et, à défaut, ceux de nature granitique, puis de nature calcaire, si toutefois la question économique n'intervient pas.

On reconnaît qu'un sable est utilisable dans les constructions quand, agité dans l'eau claire, il ne la trouble pas. Il arrive souvent qu'il contient une certaine quantité de parties terreuses ou argileuses. On ne doit alors l'employer qu'après lavage abondant jusqu'à ce qu'une nouvelle addition d'eau ne trouble pas la limpidité de celle-ci. Un bon sable est en outre dépourvu de matières organiques. Il est rude au toucher, criant sous la main lorsqu'on le broie et ne tache pas la peau. Il ne doit pas s'écraser facilement sous la pression des doigts.

La densité du sable varie avec son degré d'humidité. On admet généralement comme poids respectifs du mètre cube les chiffres suivants :

Sable fin et sec.....	1.400 à 1.430	kilogrammes
— fin et humide.....	1.900	—
— fossile et argileux....	1.710 à 1.800	—
— de rivière humide....	1.770 à 1.880	—

Le sable est employé à une foule d'usages, dont le plus important en matière de travaux publics est sans contredit

la fabrication des mortiers. Il est certain que beaucoup de mortiers se sont mal comportés parce que leur dosage était défectueux. La question de savoir quel est le dosage que l'on doit adopter est beaucoup plus compliquée qu'elle ne le paraît de prime abord.

L'attention de Vicat avait déjà été attirée sur ce point, puisque les expériences qu'il avait entreprises l'avaient conduit à conseiller pour le dosage des mortiers les sables quartzeux, qui, pour les chaux éminemment hydrauliques, étaient des sables fins, ou, à défaut, un mélange de gros sable et de fin, et enfin comme dernière ressource du gros sable. Pour les chaux qu'il appelait communes (grasses et très grasses), ce savant ingénieur recommandait, au contraire, le gros sable ou, à défaut, les sables mêlés, puis les sables fins.

Les observations de Vicat sont également applicables aux sables volcaniques et calcaires.

D'autres expériences ont été faites depuis, et l'on a constaté, pour un même volume de sable, une grande variation dans le vide occupé par l'air entre les grains qui le composent. Les sables fins, entre autres, offraient de notables différences.

De tout cela, il résulte qu'il y a nécessité de connaître exactement le vide réel correspondant à un sable donné, si l'on veut avoir un dosage pratique sur lequel on puisse véritablement compter. Aussi la Commission française des méthodes d'essai des matériaux de construction a-t-elle cru devoir prescrire dans ses conclusions des essais de mortier faits dans des conditions identiques, en recommandant l'emploi d'un sable dit *normal*, offrant des garanties sérieuses de finesse et d'homogénéité.

Ces prescriptions ne sont pas, d'ailleurs, spéciales à la France. Les Allemands emploient un sable normal extrait des bords du Rhin, qui doit passer à travers un tamis de 144 mailles et se trouve retenu sur un tamis de 64 mailles.

En France, l'adoption du sable normal a donné lieu à d'intéressantes discussions. Plusieurs propositions ont été émises. Finalement on est tombé d'accord pour reconnaître comme normal le sable extrait de la plage de Leucate (Aude). Ce sable naturel existe sur une profondeur de plusieurs

mètres et s'étend le long du rivage sur 13 kilomètres de longueur et 400 mètres de largeur. Il est composé de débris de roches pyrénéennes, que les rivières du Roussillon amènent à la Méditerranée. Il possède une texture régulière, ses grains sont arrondis.

L'analyse chimique et les essais de ce sable sont indiqués dans le tableau suivant extrait du rapport de M. Durand-Claye :

	SABLE tout venant	RÉSIDU				Sable fin ayant passé par la tôle perforée à trous de 0mm,5
		Resté sur une tôle perforée à trous de 2mm de diamètre	Recueilli entre 2 tôles perforées à trous			
			de 2mm et de 1mm,5	de 1mm,5 et de 1mm	de 1mm et de 0mm,5	
Résidu siliceux insoluble dans les acides	97,55	95,79	97,70	97,79	96,68	94,56
Alumine et peroxyde de fer.	0,43	0,29	0,36	0,49	0,69	1,71
Chaux	0,80	1,94	0,82	0,63	1,01	1,20
Magnésie	0,10	0,06	0,08	0,13	0,14	0,35
Oxyde rouge de manganèse.	0,11	0,06	0,07	0,11	0,16	0,51
Chlore	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,11
Acide sulfurique	0,01	0,00	0,00	traces	traces	0,03
Perte au feu	0,84	1,68	0,83	0,73	1,06	1,39
Matières non dosées et perte.	0,11	0,14	0,10	0,07	0,20	0,14
TOTAL	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

La densité absolue du sable de Leucate est de 2,62. Elle est à peu de chose près celle du sable de Cherbourg (2,64), qui, auparavant, était considéré comme normal et qui provenait du concassage des quartzites de la montagne du Roule.

Pour n'employer dans les essais qu'un sable absolument irréprochable, la Commission a défini ainsi le *sable normal simple :* sable formé de grains ayant passé au tamis en tôle perforée de 1mm,5 de diamètre et ayant été retenus au tamis à trous de 1 millimètre.

En outre, on appelle *sable normal composé* un mélange par poids égaux des sables ci-après :

Sable n° 1, dont les grains ayant passé au tamis de 2 millimètres ont été retenus par le tamis de $1^{mm},5$.

Sable n° 2, dont les grains ayant passé au tamis de $1^{mm},5$ ont été retenus par le tamis de 1 millimètre.

Sable n° 3, dont les grains ayant passé au tamis de 1 millimètre ont été retenus par le tamis de $0^{mm},5$.

Ces divers degrés de finesse sont représentés par les photogrammes ci-contre (*fig.* 90-91-92).

Le sable servant en pratique à la confection des mortiers

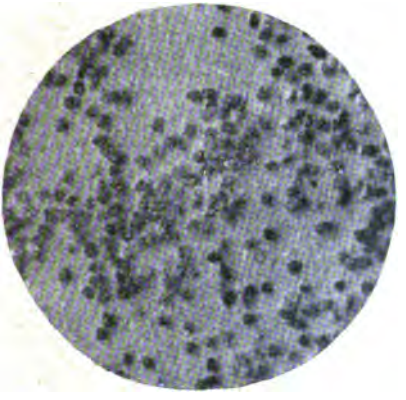

Fig. 90. — Aspect du sable n° 1.

doit être exempt de matières terreuses. Aussi est-il d'usage de lui faire subir des lavages pour le débarrasser, s'il y a lieu, des pellicules argileuses qui entourent ses grains et qui empêcheraient surtout l'adhérence de se produire. Les grains anguleux adhèrent mieux au mortier que les grains sphériques.

Mélangé à la chaux, le sable s'oppose au retrait. Il empêche les gerçures, il augmente la dureté des chaux hydrauliques, il diminue celle des chaux grasses. Ajouté au ciment, il modère le retrait, mais en affaiblit la force.

Le sable ne joue pas toujours dans la prise des mortiers le

rôle de matière inerte qu'on lui attribue trop souvent. Il est certain que, quand il ne contient que des grains de quartz

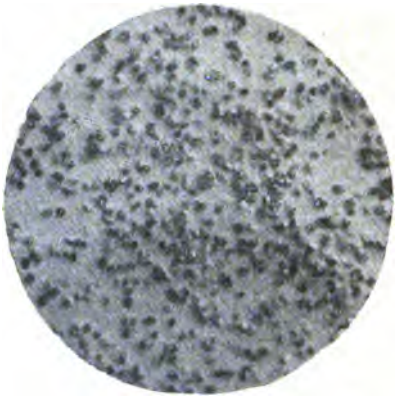

Fig. 91. — Aspect du sable n° 2.

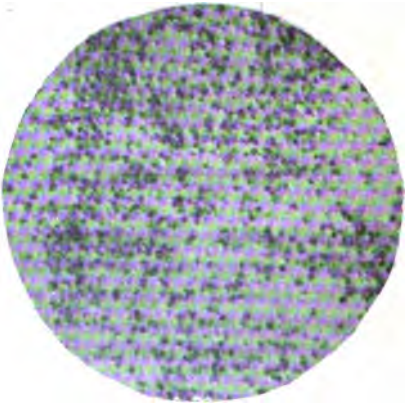

Fig. 92. — Aspect du sable n° 3.

et de carbonate de calcium, son action dans les mortiers est purement mécanique. Ces grains, formant l'ossature du

mortier, sont maintenus à leur place par la chaux et empêchent la production du retrait. Mais il n'en est plus de même quand le sable est argileux, siliceux ou formé de silicates lentement attaquables par la chaux à l'humidité et à la température ordinaire. Il se produit alors une action chimique postérieure à la prise du mortier, et qui peut être la cause d'une décomposition ultérieure. L'hydrate de chaux en grande quantité a une action lente sur les silicates; il donne naissance à du silicate de calcium hydraté ou à du silicate et à de l'aluminate de calcium avec solidification au moment de la formation.

Le béton de sable est un mortier très maigre, durcissant au bout de quelque temps. On y a recours pour édifier des massifs qui ne sont pas exposés à l'action de l'eau et qui ne sont pas destinés à supporter de fortes charges, comme le remplissage des voûtes de ponts par exemple.

L'emploi du sable marin dans les maçonneries, sans lavage préalable, est une question très controversée. La plupart des avis cependant sont en faveur du lavage naturel par l'eau pluviale. Pour faciliter la dissolution et l'enlèvement du chlorure de sodium et des autres sels déliquescents, on forme des couches disposées suivant un plan incliné.

En dehors de son emploi dans la confection des mortiers, le sable sert à une foule d'usages dans les travaux publics.

On s'en sert, par exemple, dans les fondations où son incompressibilité est mise à profit. Des puits creusés dans les sols inconsistants et remplis de sable donnent de meilleurs résultats dans certains terrains que des pieux en charpente exposés à la pourriture par suite des alternatives de sécheresse et d'humidité.

L'incompressibilité est un avantage recherché également dans les pavages, pour lesquels la qualité essentielle du sable est d'être fin, homogène et pur.

Le sable est encore utilisé dans les boîtes servant au décintrement de voûtes d'ouvrages d'art. Il jouit, en effet, de la propriété de supporter de grands efforts verticaux sans donner de poussées latérales excessives.

Le sable fin, surtout s'il est argileux, convient à l'étanchement des fuites dans les canaux à fond perméable. Celui de

Fontenay-aux-Roses et ses similaires servent à fabriquer des moules de fonderie.

Les sables blancs très purs, comme ceux de Fontainebleau (Seine-et-Marne) et de Rilly-la-Montagne (Marne), entrent dans la fabrication du verre blanc et du cristal.

Pour l'assiette des voies ferrées, on préfère, comme mode de ballastage, le gravier au sable; ce dernier est facilement soulevé par le vent, ce qui est un inconvénient pour le matériel roulant et une incommodité pour les voyageurs.

A l'Exposition de 1900, on a pu voir des briques et pierres blanches confectionnées avec des sables usés provenant des glaceries. Ces matériaux s'obtiennent par la compression énergique de ces sables séchés, broyés, malaxés et moulés. Ils sont destinés à la décoration des édifices.

En dehors des travaux publics, le sable trouve beaucoup d'applications, par exemple dans l'industrie pour le polissage des glaces, en agriculture dans l'amendement des terres (tangues, trez, maerl, faluns).

ANALYSE CHIMIQUE

Dans un certain nombre de cas, il y a intérêt à connaître les teneurs en eau, en anhydride carbonique, en argile, que renferme un sable donné. Ces éléments sont fournis par l'analyse chimique, qui permet de déterminer la proportion des corps suivants : silice, alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie, perte au feu, etc.

L'attaque des sables par l'acide chlorhydrique est très incomplète; elle laisse souvent un fort résidu insoluble. Il est nécessaire pour la décomposition entière de recourir à l'emploi des carbonates alcalins à une température assez élevée. La marche suivie pour l'analyse est la suivante :

Silice. — Un gramme de sable pulvérisé est introduit dans un creuset de platine avec 5 grammes de carbonates alcalins, mélange de carbonates de potassium et de sodium dans le

rapport de leurs poids atomiques. On chauffe dix minutes à la température de la fusion tranquille, puis on refroidit brusquement le fond du creuset pour faciliter le détachement du culot formé. On fait dissoudre ce culot dans de l'eau additionnée d'acide chlorhydrique.

On évapore ensuite à sec la liqueur obtenue, on reprend le résidu par de l'eau acidulée et on sépare par filtration la silice devenue insoluble.

Alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie, perte au feu. — Ces éléments se déterminent de la même manière qu'on le fait pour les pierres calcaires.

Argile. — Si l'on veut connaître seulement la proportion d'argile contenue dans un sable, il n'est pas utile d'effectuer une analyse complète. Une *lévigation* sur 10 grammes de matière donne avec une approximation suffisante les proportions de quartz et d'argile contenues dans l'échantillon.

Voici à titre d'exemple l'analyse d'un sable recueilli dans la rade de Brest:

ÉLÉMENTS DOSÉS	COMPOSITION CENTÉSIMALE	
Produits volatils et combustibles		
Eau hygrométrique	0,95	10,40
Matières volatiles et combustibles, non compris l'azote et l'eau.	9,25	
Azote	0,20	
Matières minérales		
Silice	37,92	89,60
Alumine et oxyde ferrique	2,28	
Anhydride phosphorique	0,09	
Chaux	31,54	
Magnésie	0,77	
Anhydride carbonique et produits non dosés	17,70	
	Total..	100,00

ESSAIS

Les sables employés dans la confection des mortiers peuvent être soumis à un certain nombre d'essais, lesquels ont été examinés par la Commission française déjà citée, qui a arrêté les conclusions suivantes :

A. **Composition granulométrique, forme des grains.** — Après avoir écarté, par un passage au tamis en tôle perforée de trous de 5 millimètres de diamètre, les graviers et cailloux, on répartit le sable proprement dit, à l'aide de tamis en tôle perforée de trous de 2 millimètres et $0^{mm},5$ de diamètre, en trois catégories, savoir :

Sable *gros*, passant au tamis de 5 millimètres, retenu par le tamis de 2 millimètres ;

Sable *moyen*, passant au tamis de 2 millimètres, retenu par le tamis de $0^{mm},5$;

Sable *fin*, passant au tamis de $0^{mm},5$.

La composition granulométrique est exprimée par les nombres de centièmes de sables des trois catégories contenus dans l'unité de poids de sable proprement dit.

La quantité de graviers et cailloux séparée du sable proprement dit est également exprimée en centièmes de ce poids.

On indique, en même temps que la composition granulométrique, la forme des grains (arrondis, anguleux, esquilleux, caverneux, coquilliers, etc.).

B. **Densité.** — *a*) La *densité absolue* (poids spécifique) est déterminée par l'une quelconque des méthodes en usage pour les matières pulvérulentes.

b) La *densité apparente* est déterminée en pesant une mesure de forme cylindrique, ayant un litre de capacité et $0^{m},10$ de hauteur, remplie de sable *sec* de la manière suivante :

L'entonnoir à tamis (§ 3), modifié par l'addition d'un obturateur à l'orifice inférieur et la suppression du tamis, est

placé à 3 centimètres au-dessus de la mesure et rempli de 1 litre et demi environ de sable. On ouvre l'obturateur de manière à laisser écouler le sable et, quand l'écoulement s'est arrêté (le sommet du cône formé par le sable en tombant dans la mesure ayant atteint l'orifice), on ferme l'obturateur et on enlève l'excès de sable, en faisant glisser sur le bord de la mesure une lame bien droite, tenue dans un plan vertical. Pendant la durée de l'opération, la mesure ne doit subir aucune trépidation ni aucun choc.

On adopte comme poids du litre la moyenne des résultats obtenus dans cinq opérations successives.

C. **Nature minéralogique.** — *a*) On sépare par lévigation et on pèse après dessiccation les matières terreuses et impalpables contenues dans le sable; leur poids est exprimé en centièmes, par rapport à l'unité de poids de sable sec.

b) On indique le degré d'homogénéité du sable ainsi que sa nature minéralogique.

D. **Essais des sables mis en œuvre.** — *a*) Ces essais sont faits sur des éprouvettes de mortiers plastiques, confectionnées à dosage égal d'un même ciment ou d'une même chaux, d'une part avec le sable normal composé, et d'autre part avec le sable à essayer.

b) On indique toutes les conditions dans lesquelles ont été faits les essais, et notamment si le dosage du sable a été effectué en poids ou en volume.

EXTRAIT DU CAHIER DES CHARGES GÉNÉRAL DU MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

ART. 3, — *Sable pour pavage.* — Le sable est de gros grain, exempt de terre ou de toute autre substance étrangère.

ART. 7. — *Sable pour mortier.* — Le sable est exempt de toute matière terreuse ou marneuse, bien criant à la main, ne s'y attachant pas, passé à la claie et lavé s'il y a lieu.

CHAPITRE XVI

BITUMES. — ASPHALTES. — GOUDRONS

Dans les voies de grande viabilité, la circulation des véhicules sur chaussées pavées ou empierrées présente de nombreux inconvénients en raison de la fatigue excessive imposée aux chevaux d'attelage, du bruit et des trépidations résultant de la sonorité du sol, ou encore par suite des fréquentes réparations inhérentes à ces modes de revêtement.

Dans certains cas, principalement dans les rues peu déclives, il y a avantage à faire usage de chaussées asphaltées qui suppriment une partie de ces inconvénients.

Or, dans le langage courant, on établit souvent une confusion entre ces deux matières : bitume, asphalte. Ces substances ne sont cependant pas synonymes.

Le bitume est un hydrocarbure de nature visqueuse, d'origine minérale, dont la couleur varie du noir au brun, tandis que l'asphalte est un mélange de carbonate de calcium et de bitume, aggloméré naturel de couleur chocolat tirant quelquefois sur le noir.

I. — BITUMES

Les bitumes se rencontrent à l'état naturel en plusieurs endroits, notamment dans certains lacs de Cuba, dans l'île de la Trinité (Antilles), à Aniches (Nord), à Murindo, près Choco (Colombie), dans la mer Morte, en Italie, en Grèce, sur les bords de la mer Caspienne, à Zante (îles Ioniennes).

En France, on en trouve surtout dans l'Ain et en Auvergne. M. Malo a adopté la classification suivante :

Bitumes	1° A l'état libre.	1° Pur (liquide ou visqueux).	Huile de naphte, pétrole, malthe de la mer Morte, fontaine de poix d'Auvergne.
		2° Impur (solide) :	Diverses espèces de houilles.
	2° Mélangé à une gangue terreuse.....		Bitume terreux du Mexique, de Cuba, de l'île de la Trinidad.
	3° Mélangé à une gangue quartzeuse.		Sables bitumineux de Pyrimont-Seyssel, de Clermont, de Bastennes, etc.
	4° Imprégnant des schistes.....		Schistes bitumineux d'Autun de Buxières-la-Grue (Allier), du Dauphiné.
	5° Imprégnant des calcaires (asphaltes).		Asphaltes de Seyssel, du Val-de-Travers, de Lobsann, de Chavaroche, de Clermont, etc.

Ces produits naturels, dont l'exploitation se fait à ciel ouvert ou par galeries souterraines, sont réduits en morceaux de 8 centimètres d'épaisseur, puis introduits dans des chaudières contenant de l'eau bouillante ; un brassage continu met les matières en mouvement. Au bout d'un certain temps, le bitume surnageant est recueilli.

M. de Coulaine a constaté qu'à la température ordinaire le bitume est sec, cassant, mou, poisseux ou liquide. Le froid fait subir au produit une contraction sensible. La température de fusion se trouve un peu au-dessous de 100°. Entre 120° et 140°, le bitume fondu répand d'épaisses fumées. La distillation sèche donne une huile bitumineuse spéciale, un peu d'eau, des gaz combustibles et un résidu noir brillant, très cassant, composé d'un tiers de charbon. Ce résidu, soumis à une température élevée, se décompose et ne laisse plus que des traces de matières minérales (silice, alumine, oxyde ferrique, oxyde de manganèse et parfois un peu de chaux).

L'odeur âcre et nauséabonde qui s'échappe des chaudières où s'opère la fusion de la matière provient de substances étrangères incorporées au bitume et non de ce dernier.

Un bon bitume offre une coloration noire brillante à reflets rouges. Au-dessus de 10°, il est cassant et présente une cassure conchoïdale. De 10 à 20°, il acquiert une certaine élasticité. A 30°, il passe à l'état pâteux. Au-dessus de 40°, il se liquéfie. La plupart des bitumes de bonne qualité se dis-

solvent presque entièrement dans l'éther, la benzine, le sulfure de carbone, l'essence de térébenthine.

II. — ASPHALTES

Le calcaire bitumineux désigné sous le nom d'asphalte est une roche sise à l'étage supérieur du terrain jurassique. Sa densité, qui est généralement de 2,00, atteint quelquefois 2,40.

A l'état de pureté, il est formé de carbone, d'oxygène, d'azote et d'hydrogène.

Un semblable minéral est considéré comme étant de bonne qualité quand il réunit les conditions suivantes :

1° Il ne renferme que du carbonate de calcium et du bitume ;

2° Il offre une apparence homogène sans interposition de grains de calcaire blanc ou de géodes remplies de bitume libre ;

3° Il fournit à l'analyse au moins 7 0/0 et au plus 10 0/0 de bitume. Il est dépourvu d'huiles volatiles. Une cuisson de six heures ne doit pas lui faire perdre plus de 2 0/0 de son poids.

Les usages de l'asphalte sont très variés. On s'en sert sous forme de mastic pour les chaussées, les dallages des gares, des quais de chemins de fer, pour les revêtements des trottoirs, les chapes des ponts ou des tunnels, dans les casernes, les casemates, les poudrières, les manutentions, les granges, les sous-sols, les cuves de brasserie, les édifices publics et privés, les écuries, remises, terrasses, etc. Le mastic asphaltique trouve encore son emploi dans les revêtements de citernes, de caves, de fosses d'aisances, dans les rigoles, bassins, toitures (carton bitumé), ainsi que sous la forme de blocs de béton dans les travaux maritimes.

Parmi les plus importantes exploitations d'asphaltes, il faut citer celles de Seyssel (Ain), Val-de-Travers (Suisse), Volant-Perrette (Ain), Chavaroche (Haute-Savoie), Puy-de-Poix (Puy-de-Dôme), ainsi que celles de Lobsann et d'Espagne.

L'extraction se fait comme pour le bitume. L'asphalte, soumis dans des cylindres métalliques à l'action de la vapeur d'eau, se délite. On pulvérise aussi la roche au moyen de laminoirs, de moulins à noix ou de meules verticales. Des blutoirs lui donnent la finesse de mouture nécessaire. La poudre obtenue est généralement additionnée de bitume et de calcaire. On la brasse de façon à avoir un mélange intime, puis on la coule dans des moules cylindriques en bois enduits de sable et d'argile ; on a ainsi les pains du commerce.

D'expériences faites par MM. Flachat et Noisette, il résulte que l'asphalte, en couches même relativement minces, est un isolant de première qualité qui empêche la propagation des incendies dans les bâtiments.

Asphalte factice. — C'est un mélange de craie de Meudon, de calcaire blanc, de terre argileuse et de bitume. Le bitume est quelquefois remplacé par du brai de gaz. Le mélange est soumis à la cuisson.

L'asphalte factice ne présente pas les mêmes qualités que le mastic d'asphalte ; il peut néanmoins, dans certains cas, rendre des services en raison de son prix de revient moins élevé.

On emploie aussi quelquefois un aggloméré composé de 150 parties de poix de houille, 50 parties de goudron de houille et 400 parties de craie, auxquels on ajoute une petite quantité de cailloux ; le tout est coulé dans des moules.

L'asphalte américain est formé de 90 0/0 de sable siliceux micacé et de 10 0/0 de bitume.

La lave fusible s'obtient en brassant à chaud 75 parties de craie et 25 parties de brai.

En général, l'asphalte factice se reconnaît :

1° Par l'odeur gazeuse qu'il dégage lorsqu'il est chauffé;

2° Par les gerçures et les dégradations rapides qui se produisent ultérieurement à son emploi et qui proviennent de l'absence d'huiles qui se sont évaporées.

III. — GOUDRONS

Il y a deux sortes de produits différents désignés sous le nom de goudrons. Ce sont : le goudron végétal et le goudron minéral.

Le goudron végétal est le produit condensé de la distillation du bois de certains arbres, tels que le pin des Landes. La distillation de ces bois donne des gaz : oxyde de carbone, anhydride carbonique, carbures d'hydrogène, et des produits liquides : eau, acide acétique, substances ammoniacales, alcool méthylique, goudrons, que l'on condense. Le résidu final est du charbon de bois.

On se sert du goudron végétal pour enduire les cordages et charpentes des navires, vannages, portes d'écluses, etc. On l'emploie bouillant et par un temps sec. Si le temps est humide, il est nécessaire de chauffer préalablement la surface à recouvrir avant de faire l'application du goudron.

Le goudron minéral ou *coaltar* est un des sous-produits de la fabrication du gaz d'éclairage. Par sa distillation la houille fournit :

Du gaz d'éclairage ;

Des eaux ammoniacales ;

Des goudrons, qui se déposent dans le barillet et dans les cylindres réfrigérants ;

Du coke.

Les goudrons recueillis sont généralement impurs et contiennent des sels ammoniacaux. Ils répandent une odeur désagréable que l'on détruit partiellement en les chauffant à 100°. La distillation fractionnée des goudrons donne trois séries de substances organiques : les huiles légères, les huiles ordinaires et les huiles lourdes. Il reste, en outre, un résidu appelé *brai*.

Les huiles légères passent entre 36° et 150°. Elles ont une densité moyenne de 0,84 et sont surtout composées de benzine ou benzène. Elles forment 6 0/0 environ du poids total du goudron.

Les huiles ordinaires se recueillent entre 150° et 200° ; leur densité varie de 0,85 à 0,90. Elles sont formées de benzène (en petite quantité), de phénol, d'aniline, de styrolène, d'hydrure de naphtalène et d'autres carbures complexes. Il y en a 20 à 25 0/0 du poids du goudron.

Les huiles lourdes passent au-dessus de 200°. Elles sont constituées par l'acénaphtène, le fluorène, l'anthracène, le phénanthrène, etc. Elles marquent 5° au pèse-liqueur, tandis que les huiles ordinaires marquent 15°.

Enfin, le brai reste comme résidu dans la cornue. Suivant sa nature, on le désigne sous les noms de brai liquide, brai gras ou brai sec. On en trouve de 60 à 65 0/0 du poids total du goudron.

Le brai liquide, visqueux lorsqu'il est froid, est employé à la fabrication du charbon de Paris. On utilise le brai gras à la confection de l'asphalte factice. Enfin, le brai sec sert le plus souvent à la fabrication des agglomérés.

ANALYSE CHIMIQUE DES BITUMES ET DES ASPHALTES

L'analyse chimique constitue, à vrai dire, le principal critérium de la qualité des bitumes et des asphaltes. Elle s'effectue de la façon suivante :

Dosage du bitume. — Un échantillon de 2 à 5 grammes de matière réduite en petits fragments est introduit dans un flacon d'Erlenmeyer dans lequel on verse une quantité suffisante d'un dissolvant, tel que l'éther, la benzine ou le sulfure de carbone; ce dernier réactif est le plus souvent employé. On bouche le flacon et on laisse reposer le tout pendant quelque temps. On décante ensuite la partie liquide sur un filtre en papier et on recommence la digestion du résidu avec une nouvelle quantité de dissolvant ; on filtre à nouveau et ainsi de suite jusqu'à ce que la liqueur surnageante soit complètement incolore. Le filtre est lavé avec un peu de sulfure de carbone et les *filtrats* successifs sont réunis dans une capsule de platine tarée. On place ensuite cette capsule au-dessus d'un bain-marie contenant

de l'eau chaude, en évitant de mettre le récipient à proximité d'une flamme, en raison de l'extrême inflammabilité de l'éther ou du sulfure de carbone. Après évaporation, il ne reste plus dans la capsule qu'une matière visqueuse d'un beau reflet noir : c'est le bitume. On pèse la capsule ; on a ainsi le poids du bitume.

On porte ensuite cette capsule au rouge, afin de constater s'il y a volatilisation complète de la matière. Dans le cas où l'on observe un résidu, celui-ci est composé de substances minérales. Il faut alors en tenir compte dans l'analyse.

Matières étrangères. — Le filtre provenant de l'opération précédente est desséché, puis placé dans un appareil de Berzélius et Rose dans lequel on ajoute de l'acide chlorhydrique. La différence de poids résultant du dégagement de gaz donne la teneur en *anhydride carbonique*.

La liqueur restée dans le récipient est chauffée un peu au-dessous de son point d'ébullition, puis filtrée. On obtient ainsi les *matières insolubles* que l'on recueille sur un filtre desséché à 100° et pesé. Ces matières, calcinées au rouge vif, font connaître, en cas de différence avec le poids précédent, les *matières charbonneuses* combustibles que contient le produit.

La liqueur filtrée est portée à l'ébullition avec quelques gouttes d'acide azotique ; on l'additionne ensuite d'ammoniaque ; on obtient un précipité d'*alumine* et d'*oxyde ferrique*.

Après séparation de ces oxydes, la liqueur restante est traitée par l'oxalate d'ammonium, ce qui donne lieu à un précipité d'oxalate de calcium qui, calciné au rouge vif, fournit de la *chaux*.

La *magnésie* restée dans la liqueur filtrée se précipite par le phosphate de sodium. Le phosphate ammoniaco-magnésien formé donne, par calcination, du pyrophosphate de magnésium ; on en déduit aisément la magnésie.

L'*eau* et les *matières volatiles* s'obtiennent en opérant sur une prise spéciale d'échantillon que l'on porte à la température de 100°. Elles sont données par la différence de deux pesées.

Si le produit renferme des *pyrites* (bisulfure de fer), ces dernières se trouvent dans le résidu insoluble. Ce résidu est recueilli dans une capsule, puis traité par de l'acide azotique auquel on ajoute un peu de chlorate de potassium. On chauffe à une douce chaleur; le soufre s'oxyde et se transforme en acide sulfurique, et le fer passe au maximum. Une filtration sépare le sable et l'argile. On précipite dans la liqueur les sels de fer par l'ammoniaque. On recueille l'oxyde ferrique, ce qui permet de connaître la quantité de fer combiné. La liqueur filtrée, séparée des sels de fer, est ensuite chauffée, rendue acide, puis additionnée de chlorure de baryum. Le sulfate de baryum précipité sert à déterminer la teneur en soufre.

On a ainsi les deux éléments, soufre et fer, qui constituent par leur combinaison le bisulfure de fer.

Le *sable* peut se déterminer par lévigation sur une prise spéciale d'échantillon.

Recherche du brai de gaz. — Les réactions et procédés employés pour cette recherche ont été indiqués par M. L. Durand-Claye :

I. Si l'on met dans un verre à pied du brai de gaz ou de l'asphalte factice et que l'on y verse un dissolvant tel que la benzine, l'éther, l'acide acétique, le chloroforme, l'essence de térébenthine ou l'alcool, la liqueur prend un aspect opalin vert bleuâtre.

Il ne se produit pas de coloration avec un bitume naturel.

II. Dans un tube à essai, on met 1 gramme de matière et 5 centimètres cubes de benzine rectifiée ; on agite jusqu'à ce que la benzine prenne une teinte presque noire. On filtre au-dessus d'un autre tube à essai de manière à recueillir 5 ou 6 gouttes de liqueur. On ajoute 5 centimètres cubes de benzine et 5 centimètres cubes d'alcool. On agite vivement et on laisse reposer. Au bout de peu de temps, le liquide se sépare en deux couches : l'une, supérieure, est de la benzine fortement colorée ; l'autre, inférieure, est de l'alcool coloré en jaune d'or par le brai. Le bitume, en effet, ne colore pas l'alcool ou ne donne qu'une faible coloration.

Une proportion d'un dixième de brai dans un asphalte est ainsi nettement décelée.

III. Si le résidu desséché et pulvérisé provenant du traitement de l'échantillon par le sulfure de carbone est mis en digestion avec de l'alcool, la liqueur reste incolore ou ne présente qu'une teinte un peu ambrée, quand on a affaire à un bitume naturel ; elle devient jaune d'or et fluorescente quand il y a du brai de gaz.

IV. Des réactions précédentes, M. L. Durand-Claye en a déduit le moyen suivant pour constater la présence du brai dans un produit asphaltique :

On fait digérer la matière dans le sulfure de carbone ; on filtre. On évapore à sec la liqueur filtrée jusqu'à ce que l'on obtienne une substance dure et cassante. On pulvérise cette substance dans un mortier et on en prélève $0^{gr},1$ que l'on met dans un tube à essai contenant 5 centimètres cubes d'acide sulfurique à 66° Baumé. On ferme le tube avec un bouchon et on laisse reposer pendant vingt-quatre heures. On ajoute ensuite avec précaution et par portions successives 10 centimètres cubes d'alcool, en évitant une trop grande élévation de température.

On filtre, on lave le filtre et on complète le volume à 100 centimètres cubes avec de l'eau distillée. Il y a une coloration à peine sensible dans le cas de bitumes naturels et une coloration brun foncé avec le brai ou l'asphalte factice.

La comparaison de teintes obtenues donne une idée approximative de la quantité de brai employée.

PRATIQUE DES ESSAIS

Essais des asphaltes. — Les essais sont les suivants :

1° Essais d'homogénéité ;

2° Détermination de la proportion de bitume ;

3° Analyse chimique de la roche privée de bitume.

Essais d'homogénéité. — La simple inspection des roches à

l'œil fait reconnaître par la différence de nuance si le bitume est également réparti dans la roche.

Si l'échantillon est présenté en poudre, l'emploi de la loupe est recommandé pour vérifier l'homogénéité : le grossissement à employer est de 10 diamètres.

Détermination de la proportion de bitume. — Après avoir pulvérisé des échantillons prélevés en divers points de la roche à essayer et les avoir bien mêlés de façon à obtenir une poudre homogène, on fait sécher cette poudre avec les précautions convenables et on en prend 1 gramme.

On détermine la quantité de bitume contenu dans ce gramme en le dissolvant au moyen de lavages méthodiques et successifs avec du sulfure de carbone pur, exempt de soufre et ne laissant aucun résidu par l'évaporation.

A titre de vérification, on détermine le poids de la poudre restant après lavage.

Analyse chimique de la roche privée de bitume. — Cette analyse chimique a lieu par les méthodes ordinaires et on s'attache surtout à déterminer les proportions de sable, d'argile et de pyrite de fer.

Essais des bitumes. — Les essais particulièrement recommandés sont les suivants :

1° Perte à 100° C.;
2° Dosage de l'argile;
3° Présence du soufre;
4° Présence du brai.

Goudrons. — Les goudrons végétaux et les goudrons minéraux n'ont qu'une importance secondaire au point de vue de leurs rapports avec les matériaux de construction : aussi, ne juge-t-on pas utile de les soumettre à des analyses ou à des essais. Ces produits sont, d'autre part, très complexes et les déductions peu concluantes d'ailleurs que l'on en tirerait ne seraient pas en rapport avec le travail analytique considérable auquel on se livrerait.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les essais et l'analyse chimique (l'analyse chimique surtout) fournissent de précieux renseignements sur les produits qui viennent d'être passés en revue.

Le sable, ne se prêtant pas aussi bien que le calcaire à la compression, doit se trouver en faible quantité.

L'argile ne doit pas exister en proportion notable, car elle aurait l'inconvénient de provoquer des gonflements par les temps humides et des retraits par la sécheresse. Une teneur de 2 0/0 paraît être la limite maxima à adopter.

Les pyrites sont toujours à redouter. Le chauffage de la matière qui en contient peut faire perdre une partie du soufre; les pyrites passent à l'état de sulfures. Or, on sait que les sulfures de fer sont des corps instables, absorbant facilement l'oxygène de l'air pour se transformer en sulfates de fer solubles. Il y a donc à craindre, après emploi, une détérioration de la chaussée ou du revêtement.

Un *bon bitume* ne doit renfermer ni corps étrangers, ni eau, ni huiles légères en proportion notable. Chauffé à 110° pendant quarante-huit heures, il ne doit pas perdre plus de 3 0/0 de son poids. Il ne doit pas être visqueux, cassant ou liquide à la température ordinaire. Étiré en fil, il doit s'allonger et se rompre en pointe fine. Le brai de gaz ne doit pas entrer dans sa composition.

La *poudre asphaltique* destinée à la fabrication de l'asphalte comprimé doit contenir au moins 6 0/0 et au plus 13 0/0 de bitume.

Le laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées a procédé à l'analyse de divers produits dont les résultats sont consignés dans le premier tableau de la page 219.

D'autre part, des tronçons de chaussées en asphalte en service à Paris ayant été soumis à l'analyse ont donné les résultats relatés dans le deuxième tableau de la page 219.

ÉLÉMENTS DOSÉS	LIEUX D'ORIGINE					
	VAL-DE-TRAVERS (Suisse)	SEYSSEL (Ain)	LOBSANN (Alsace)	SICILE (Italie)	MAESTU (Espagne)	FORENS (Ain)
Bitume	10,10	8,00	11,90[1]	8,85	8,80	2,25
Carbonate de calcium	87,95	89,55	69,46	87,50	9,15	97,00
Sable siliceux	»	»	3,05	0,60	57,40	»
Alumine et oxyde ferrique	0,25	0,15	5,70[2]	0,90	4,35	0,15
Carbonate de magnésium	0,30	0,10	0,30	0,95	8,10	0,20
Matières insolubles dans les acides	0,45	0,10	»	»	11,35	0,05
Soufre	»	»	5,00	»	»	»
Eau et matières volatiles à 100°	0,50	1,90	3,40	0,80	0,40	0,25
Produits non dosés et pertes	0,45	0,20	1,19	0,40	0,45	0,10
TOTAUX	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

1. Cette quantité paraît contenir une certaine proportion d'huile qui n'a pas été déterminée exactement et qui se trouverait à l'état de mélange dans le bitume.
2. Y compris 4,44 de fer combiné au soufre.

ÉLÉMENTS DOSÉS	TRONÇONS DE CHAUSSÉES PRÉLEVÉS EN DIVERS ENDROITS DE PARIS				
	1	2	3	4	5
Bitume	8,95	12,65	10,25	13,40	10,70
Résidu insoluble dans les acides (Sable et silicates)	30,90	19,25	27,75	18,45	24,25
Résidu insoluble dans les acides (Soufre des pyrites)	0,28	0,63	0,31	0,54	0,37
Alumine et oxyde ferrique	1,95	2,05	1,35	1,50	1,80
Chaux	32,30	36,15	33,35	36,45	35,45
Magnésie	0,09	0,16	0,10	0,25	0,07
Anhydride sulfurique	0,20	0,68	0,20	0,15	0,20
Anhydride carbonique	25,45	28,60	26,45	28,06	27,20
Produits non dosés et pertes, sans déduction de l'oxygène correspondant au soufre	—0,12	—0,17	0,24	0,86	0,04
TOTAUX	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

EXTRAIT DU CAHIER DES CHARGES GÉNÉRAL DU MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

ART. 25. — *Goudron.* — Le goudron végétal à employer pour le goudronnage des bois est de la première qualité fournie par le commerce. On le fait bouillir et on y verse de la chaux éteinte en poudre, en quantité nécessaire pour que le goudron acquière une consistance suffisante.

Dans le cas où l'on emploie du goudron minéral, on le fait bouillir au préalable avec de la chaux vive, de manière à en faire disparaître les sels ammoniacaux.

Le coaltar à employer sur les chapes ou sur les murs exposés aux infiltrations est purgé d'huile essentielle et est liquide.

ART. 27. — *Bitume.* — Le bitume est composé de roche calcaire asphaltique réduite en poudre par une demi-calcination, et de mastic ou de goudron minéral à l'exclusion de goudron de gaz.

CHAPITRE XVII

BOIS

La qualité des bois diffère suivant les espèces; pour une espèce donnée, elle varie suivant son âge et son développement. Les vices ou défauts, ainsi que des traitements qu'ils ont subis, fournissent des éléments qui peuvent aussi faire varier la valeur de ces bois.

L'expérience apprend quelles sont les espèces qui conviennent aux divers travaux que l'on exécute. Ainsi, dans la marine, on emploie le chêne, l'orme, le teck, le hêtre, le noyer, etc. Dans la construction, on a recours au chêne et aux bois résineux. Les traverses de chemin de fer sont le plus souvent débitées dans le chêne, le hêtre, le pin. Pour les poteaux télégraphiques, on fait usage de pin et de sapin non gemmés. Toutes les essences conviennent en général aux étais de mines. Le pavage des rues réussit avec le pin, le sapin, l'acajou.

On sait que certains bois exigent pour leur conservation une injection préalable faite avec des substances antiseptiques, comme le chlorure de zinc, le sulfate de cuivre, le chlorure mercurique.

ANALYSE CHIMIQUE

L'analyse chimique est d'un faible secours dans l'appréciation de la qualité des bois.

L'analyse élémentaire fournit la teneur des éléments suivants : carbone, hydrogène, oxygène, azote et cendres.

Le tissu ligneux se compose de cellulose associée à un corps incrustant, le *duramen*, lequel, d'après Dutrochet et Payen, est formé des quatre principes suivants :

La lignose, soluble dans la dissolution de chaux et de soude ;

La lignone, soluble dans la dissolution de chaux, de soude et d'ammoniaque ;

Le lignin, soluble en outre dans l'alcool ;

La ligniréose, soluble aussi dans l'alcool, mais insoluble dans l'ammoniaque et seule des quatre substances précitées soluble dans l'éther.

Les recherches de Frémy, Urqain, Payen et Billequin, citées par M. André Thil, inspecteur des Eaux et Forêts, dans son *Rapport sur la constitution anatomique du bois*, ont permis de reconnaître deux éléments constitutifs dans les bois : la cellulose $(C^{12}H^{10}O^{10})^n$ et la vasculose $C^{36}H^{20}O^{16}$ ou $C^{19}H^{12}O^{10}$. La cellulose se rencontre sous trois formes : la cellulose simple $(C^{12}H^{10}O^{10})^6$, la paracellulose ou cellulose condensée $(C^{12}H^{10}O^{10})^7$ et la métacellulose $(C^{12}H^{10}O^{10})^{7-x}$. Les analyses faites par Frémy et Urbain ont donné les résultats suivants relatifs à diverses espèces :

ESPECES	VASCULOSE	CELLULOSE et PARACELLULOSE
Peuplier	18 0/0	64 0/0
Chêne	28 —	53 —
Buis	34 —	28 —
Ebène	35 —	20 —
Gaïac	36 —	24 —
Bois de fer	40 —	27 —
Moelle de sureau	25 —	38 paracellulose 37 cellulose

La quantité de cendres varie avec les essences, et pour une même essence avec la nature du sol, comme le montre le tableau ci-après (A. Thil).

SUBSTANCES MINÉRALES DE LA CENDRE	PIN MARITIME CRÛ en sol		CHATAIGNIER CRÛ en sol		OBSERVATIONS
	crayeux	marno-siliceux	crayeux	marno-siliceux	
Chlore	»	»	0,08	»	Les cendres provenaient de rameaux non écorcés et munis de leurs feuilles.
Acide sulfurique	»	»	0,64	1,43	
Acide phosphorique	9,14	9,00	4,27	4,53	
Silice	6,42	9,18	1,36	3,08	
Potasse	4,95	16,04	2,69	11,65	
Soude	2,52	1,91	0,28	»	
Chaux	56,14	40,20	87,30	73,26	
Magnésie	18,80	20,09	2,07	3,99	
Oxyde de fer	2,07	3,83	1,27	2,04	

PRATIQUE DES ESSAIS

Les essais auxquels sont soumis les bois ont principalement pour but de déterminer les résistances à la traction, à l'écrasement et à la flexion.

I. **Caractères physiologiques et essais organoleptiques.** — On relate, autant que possible, toutes les indications relatives à la provenance, à l'âge et à l'époque de l'abatage des bois, aux conditions dans lesquelles l'arbre a vécu (nature du sol, climat, genre de culture, etc.), et, s'il s'agit de petits échantillons, à la partie de l'arbre à laquelle appartient l'échantillon. L'espèce botanique du bois étudié doit être donnée avec la plus grande précision et avec l'indication du botaniste descripteur.

On procède à un examen microscopique de copeaux ou tranches extrêmement minces, prélevés au microtome sur les bois à étudier dans les trois sens ci-après indiqués :

Section transversale perpendiculaire à l'axe de croissance;

Section tangentielle aux accroissements et parallèle à l'axe de croissance ;

Section radiale passant par l'axe de croissance et un rayon de la bille perpendiculaire à cet axe.

Ces copeaux, examinés par transparence, font ressortir les caractères physiologiques et les propriétés organoleptiques des bois.

On note spécialement :

a) Le nombre des couches annuelles, depuis le pourtour jusqu'au centre, si on est en possession d'une tranche complète de l'arbre ;

Leur épaisseur maxima, minima et moyenne, leur disposition régulièrement concentrique ou excentrique, les variations de cette épaisseur ;

Leur direction plus ou moins rectiligne parallèlement à l'axe de croissance, l'importance relative du bois de printemps ou du bois d'automne ou l'homogénéité plus ou moins grande du tissu ;

b) L'épaisseur de l'aubier ;

c) Le mode de groupement et la grosseur des vaisseaux, la disposition relative des fibres, du parenchyme et des rayons médullaires, et autant que possible la proportion existant entre les diverses parties du tissu ;

d) Le degré d'obstruction des vaisseaux par les thylles ou matières diverses, la nature de ces matières et de celles qui incrustent ou imbibent les parois (sels calcaires ou sels minéraux divers, silice, principes huileux ou résineux, gommes, etc.) ;

e) La qualité du bois au point de vue du travail ; sa couleur, son odeur et la nature du grain, ses différents retraits dans les trois sens, longitudinal, radial et circonférentiel ;

f) Si l'étude chimique est entreprise, elle doit indiquer notamment : la proportion entre la cellulose, la paracellulose et la vasculose, la quotité des cendres, les divers produits végétaux ou minéraux contenus dans les cavités des cellules et ceux qui imprègnent les parois.

II. **Vices et tares.** — On recherche les vices et tares (pourriture humide ou sèche, grisette et ses variétés, nœuds,

cadranures, roulures, gélivures, frottures, lunure ou double aubier, entr'écorces, fibres torses, fentes et gerçures, piqûres de vers, etc.).

III. **Aptitude à la conservation.** — Si le bois est vierge, on recherche, par une expérience directe, quelle est son aptitude à l'injection.

Si le bois est injecté, on examine la nature de la préparation antiseptique qu'il a absorbée et la profondeur de l'absorption.

IV. **Essais physiques.** — On procède, suivant les méthodes employées pour les pierres, à la détermination de la densité apparente, à l'état sec et à l'état d'imbibition complète, ce dernier état étant défini par la constance du poids de l'éprouvette imbibée.

(La durée de l'immersion est variable suivant la porosité du bois expérimenté.)

On mesure également, par les mêmes procédés, le pourcentage d'humidité contenue dans l'échantillon soumis à l'examen, à l'état où il se trouve au moment de sa présentation.

V. **Essais mécaniques.** — Si l'on étudie des billes de bois en grume, les échantillons sont prélevés dans ces billes aux places indiquées par le schéma ci-contre (*fig.* 93); si l'on étudie des pièces déjà équarries, les échantillons sont prélevés de façon à se rapprocher le plus possible des emplacements indiqués sur ledit schéma.

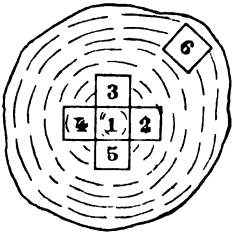

Fig. 93. — Schéma d'une bille de bois.

A. *Résistance à la flexion. — Module d'élasticité.* — On mesure la résistance à la flexion et le module d'élasticité sur des éprouvettes carrées de $0^m,10$ de côté et de $1^m,50$ de longueur entre les points d'appui, chargées en leur milieu de poids régulièrement croissants.

Ces éprouvettes sont débitées à la scie, à vives arêtes, et suivant des faces rigoureusement perpendiculaires deux à deux.

L'orientation des couches annuelles par rapport à la direction de l'effort de flexion doit être soigneusement notée, cette orientation étant de nature à modifier les résultats de l'épreuve.

On doit préserver les fibres de l'éprouvette de toute morsure des couteaux ou pivots qui servent de points d'appui ou de pression, en interposant, entre elles et les couteaux ou pivots, des cales en bois suffisamment épaisses ou des cales métalliques.

L'intensité des charges doit être calculée de telle sorte que le temps total de l'épreuve, arrêtée au moment où cesse la proportionnalité entre les charges et les flèches, n'excède pas huit à dix minutes.

L'enregistrement des flèches est fait au dixième de millimètre.

Le module d'élasticité E est calculé suivant la formule usuelle

$$E = \frac{L^3}{4bh^3}\frac{P}{f},$$

où L est la distance entre les points d'appui ;

P, la charge au milieu ;

f, la flèche ;

b, la largeur, et h, la hauteur de l'éprouvette.

L'épreuve porte sur six éprouvettes au moins à l'état sec, et sur trois éprouvettes à l'état d'imbibition complète. Les épreuves à l'état sec sont faites de la façon suivante : la première éprouvette, prise au centre de l'arbre, permet d'étudier la flexion sur des accroissements entièrement circulaires ; deux éprouvettes prises près du centre sont essayées, l'une en fléchissant vers le centre, l'autre en fléchissant vers la périphérie de la tige. Deux autres, prises dans le bois parfait, sont soumises à des flexions normale et parallèle aux plans des accroissements successifs ; enfin, une

dernière est prise dans l'aubier et subit une flexion perpendiculaire aux plans des accroissements.

On mesure la résistance à la rupture par flexion en poussant l'épreuve jusqu'à la rupture sur les mêmes éprouvettes et en notant le poids qui a déterminé la rupture.

B. *Résistance à l'écrasement.* — On mesure la résistance à l'écrasement, caractérisée par un commencement de séparation des fibres, parallèlement et perpendiculairement aux fibres, sur des éprouvettes à section carrée de $0^m,10$ de côté et de $0^m,15$ de hauteur, débitées à la scie de façon que leurs fibres soient bien parallèles aux grandes faces, et rigoureusement perpendiculaires aux petites.

L'épreuve faite parallèlement aux fibres s'exécute en plaçant les éprouvettes debout entre les deux plateaux d'une presse hydraulique.

L'épreuve faite perpendiculairement aux fibres s'exécute sur trois éprouvettes placées à plat entre les deux mêmes plateaux. La première est prise au centre de la tige, de manière à agir sur des accroissements complets ; les deux autres, prélevées latéralement, sont pressées : la première vers le centre de la tige, et la seconde perpendiculairement à cette direction.

On note la charge d'écrasement et la surface portante, dans les deux cas, et on rapporte la résistance au centimètre carré de la surface portante.

Trois éprouvettes au moins sont essayées à l'état sec, et trois à l'état d'imbibition, dans l'une et l'autre épreuve.

C. *Résistance à la traction.* — On mesure la résistance à la traction sur des éprouvettes rectangulaires de $0^m,06$ sur $0^m,02$ de section et de $0^m,30$ de longueur ; les têtes, à section carrée, ont $0^m,08$ de côté et $0^m,10$ de longueur. Pour les bois à croissance rapide, l'épaisseur de l'éprouvette est portée à $0^m,05$ afin de soumettre à l'essai plusieurs accroissements successifs. Ces têtes sont saisies entre les mâchoires d'une machine de traction ordinaire, munies de mordaches à coins pour empêcher le glissement pendant la traction.

Les éprouvettes doivent être travaillées de façon à éviter autant que possible de couper les fibres.

On note la charge de rupture par millimètre carré de la section de la partie utile, avant traction.

L'essai porte, comme les précédents, sur trois éprouvettes au moins à l'état sec, et sur trois éprouvettes à l'état d'imbibition.

D. *Résistance au cisaillement.* — La résistance au cisaillement est mesurée, au moyen de l'appareil employé par M. Johnson au laboratoire de Saint-Louis, sur des éprouvettes carrées de $0^m,05$ de côté et de $0^m,20$ de longueur, percées près de chacune de leurs extrémités d'une mortaise rectangulaire de $0^m,025$ de largeur; chaque mortaise est défoncée par une clavette en fer rectangulaire de même épaisseur, actionnée par une machine à traction.

Les deux joues de chaque mortaise sont maintenues contre l'écartement par une petite crampe à vis dont on règle le serrage au degré juste nécessaire pour sa tenue en place.

Les deux mortaises sont dirigées à angle droit l'une de l'autre, de façon à donner la résistance au cisaillement dans les deux sens perpendiculaires.

On note la charge sous laquelle chacune des mortaises a été défoncée et on la rapporte à la surface de glissement sur laquelle a porté l'effort.

L'essai est fait sur quatre éprouvettes de la façon suivante : deux seront soumises au cisaillement dans le sens perpendiculaire aux fibres : dans la première la force agit dans le plan radial, et dans la seconde dans le plan perpendiculaire; les deux autres sont éprouvées au cisaillement dans le sens parallèle aux fibres : la force agit dans les plans radiaux et tangentiels aux accroissements.

E. *Résistance à l'usure par le frottement.* — On mesure la résistance à l'usure par le frottement, quand l'emploi des bois le comporte, au moyen de l'appareil utilisé au laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées pour mesurer la résistance des pierres au même genre d'effort. Les éprouvettes, à section rectangulaire, ont $0^m,06$ sur $0^m,04$ de base et $0^m,12$ de hauteur. Elles sont placées deux par deux sur la meule tournante en fonte saupoudrée d'émeri n° 3, chacune de leurs extrémités portant à tour de rôle sur la surface frottante, sous une charge de 250 grammes par

centimètre carré. On note l'usure après un nombre déterminé de tours de meule.

Deux éprouvettes sont essayées à l'état sec, l'une perpendiculairement et l'autre parallèlement à la direction des fibres, et deux à l'état d'imbibition complète.

BOIS POUR PAVAGE

En ce qui concerne les bois employés au pavage, il y a lieu de :

1° Définir les conditions de leur provenance, au point de vue du lieu, de l'exposition. de la nature du sol, de l'âge, de l'époque d'abatage, du mode d'exploitation, etc. ;

2° Spécifier les résultats des essais organoleptiques ordinairement indiqués pour le bois, savoir : bois parfaitement sains, contexture compacte et uniforme, grain fin et serré, importance de l'aubier, échauffure, carie, gerçures profondes, cadranures, gélivures, roulures, nœuds vicieux, vermoulures, etc. ;

3° Déterminer leur densité, leur élasticité, leur résistance à l'usure par frottement, par écrasement, par choc, leur poussée et dilatation sous l'influence de l'humidité.

RÉSULTATS DES ANALYSES ET DES ESSAIS

La densité d'un bois est variable suivant qu'il est fraîchement coupé, séché à l'air ou fortement desséché. Elle varie aussi suivant l'âge, la provenance et la qualité de l'échantillon.

Le tableau ci-après, établi par Gayer, donne la différence entre le poids du mètre cube de bois vert et de bois séché à l'air libre :

ESPÈCES	POIDS DU MÈTRE CUBE DE BOIS		QUANTITÉ D'EAU	PROPORTION POUR 100
	vert	desséché à l'air	évaporée	d'eau évaporée dans le bois séché à l'air
	kilogr.	kilogr.	kilogr.	pour 100
Mélèze	760	620	140	22,5
Frêne commun	920	750	170	22,6
Pin sylvestre	700	520	180	34,6
Chêne pédonculé	1.100	860	240	27,9
Chêne rouvre	1.010	740	270	36,5
Epicéa commun	730	470	260	55,0
Orme champêtre	950	680	270	49,0
Erable sycomore	930	660	270	40,0
Hêtre commun	1.010	740	270	36,4
Aune glutineux	820	530	290	54,0
Tilleul	740	450	290	64,4
Pin Weymouth	730	430	300	69,8
Aune blanc	800	490	310	60,3
Peuplier tremble	800	490	310	60,3
Saule	850	530	320	60,0
Bouleau blanc	940	610	330	50,4
Charme commun	1.080	720	360	50,0
Pin noir	1.000	570	430	70,7
Peuplier blanc	950	480	470	97,9
Sapin pectiné	1.000	480	520	108,3

Le bois est très hygroscopique. Il absorbe après dessiccation l'eau perdue qu'il reprend à l'air sec ou au milieu dans lequel on le place.

Les bois d'ébénisterie et d'appartement doivent être très secs au moment de leur emploi.

La composition chimique des cendres de quelques espèces forestières a été déterminée par MM. Malaguti et Durocher, qui ont trouvé les chiffres suivants :

ESPÈCES	CHLORE	ACIDE SULFURIQUE	ACIDE PHOSPHORIQUE	SILICE	POTASSE	SOUDE	CHAUX	MAGNÉSIE	OXYDES d'aluminium, de fer et de manganèse	PARTIES solubles	PARTIES insolubles
Chêne pédonculé	traces	1,62	9,33	3,05	19,83	traces	54,00	7,46	4,71	17,00	83,00
Chêne rouvre	0,30	1,61	7,41	1,38	11,60	2,18	70,14	4,97	0,41	14,77	85,23
Pin du Nord	1,00	10,29	6,11	5,81	16,24	6,49	44,74	7.12	1,60	27,56	72,44
Pin sylvestre	1,21	1,45	3,74	8,72	17,33	1,52	60,74	4,36	0,93	15,80	84,20
Epicéa commun	2,07	1,60	2,60	12,55	12,84	5,65	58,27	2,81	1,60	17,20	82,80
Peuplier d'Italie	0,29	0,74	11,52	0,30	10,17	0,52	71,25	4,84	0,17	10,54	89,46
Peuplier tremble	traces	0,32	13,30	1,61	13,44	traces	66,50	3,23	1,60	7,00	93,00
Peuplier de Virginie	0,47	4,07	14,47	1,86	11,32	1,58	49,10	7,66	4,47	11,00	89,00
Peuplier noir	traces	1,40	11,00	3,69	16,90	traces	52,54	11,67	2,80	15,00	85,00
Peuplier blanc	traces	6,85	15,20	2,68	18,00	traces	51,83	9,84	1,70	20,50	79,50
Saule cendré	0,70	3,07	16,35	0,70	11,37	5,61	50,77	10,13	1,30	16,00	84,00
Orme	0,77	5,42	9,61	6,16	24,08	2,10	37,93	10,01	3,92	29,55	70,45
Alisier torminal	0,60	0,31	4,47	3,04	9,25	1,26	64,48	13,00	3,65	12,36	87,64
Merisier	0,14	1,25	4,91	6,24	10,41	6,22	60,31	8,68	1,84	14,83	85,17
Acacia	0,47	3,56	11,51	2,71	10,53	5,66	58,30	6,79	0,47	16,90	83,10
MOYENNES	0,50	2,50	9,44	4,03	14,22	2,59	56,73	7,50	2,08	17,57	82,43

OBSERVATIONS. — Les analyses ont porté sur des branches de 0,02 à 0,015 de diamètre non écorcées.

Dans son *Traité des Matériaux de construction*, M. l'Inspecteur général Debauve donne les renseignements suivants sur les résistances de diverses essences :

I. — Résistance a la traction

(charge de rupture par centimètre carré)

1° traction parallèle aux fibres

Chêne	600 à 1.000 kilogr.
Sapin	800 à 900 —
Tremble	600 à 700 —
Frêne	1.200 —
Orme	1.040 —
Hêtre	800 —
Teak	1.100 —
Buis	1.400 —
Poirier	690 —
Acajou	560 —

2° traction perpendiculaire aux fibres

Chêne	160 kilogr.
Peuplier	125 —

II. — Résistance a l'écrasement

(charge de rupture par centimètre carré)

Chêne de France	380 à 460 kilogr.
Sapin	460 à 538 —
Chêne anglais	455 à 706 —
Sapin de Prusse	456 à 479 —
Pin rouge	379 à 528 —
Hêtre	543 à 658 —
Orme	726 —
Peuplier	218 à 360 —
Noyer	426 à 507 —

III. — Résistance a la flexion (tension *maxima* en kilogrammes par centimètre carré qui se produit lors de la rupture sur la fibre la plus éloignée de l'axe).

Acacia	1.093	Noyer	732
Bois de fer	1.050	Orme	707
Chêne maigre	690	Pin laricio de Corse	806
Chêne gras	470	Platane de Provence	671
Chêne de Provence	459	Sapin	530
Chêne-liège	682	Teak	836
Frêne	1.186	Tilleul de Provence	648
Gaïac	1.771	Pin sylvestre	633
Mélèze	590		

COEFFICIENT D'ÉLASTICITÉ DE QUELQUES BOIS

(Les chiffres ci-après doivent être multipliés par 10)

Acacia	0,98	Noyer	0,70
Bois de fer	0,82	Orme	0,87
Chêne maigre (Bourgogne)	0,94	Pin des Florides	1,32
— gras (Bourgogne)	0,86	Pin sylvestre	1,09
— maigre (Dantzig)	1,07	Platane de Provence	0,97
— vert	0,70	Sapin des Alpes-Maritimes	1,09
Frêne	1,40	Sapin de Suède	0,78
Gaïac	1,17	Teak	1,06
Mélèze	0,65	Tilleul de Provence	0,85

EXTRAIT DU CAHIER DES CHARGES GÉNÉRAL DU MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

ART. 19. — *Bois.* — Tous les bois doivent être droits, sains, unis, sans roulures, pourritures, gélivures, nœuds vicieux, ni défauts d'aucune sorte. Les bois résineux ne doivent pas avoir été saignés pour en extraire la résine.

Ils ont au moins un an d'abatage pour les charpentes et deux ans pour les menuiseries. Ils doivent avoir été abattus avant la montée de la sève de printemps. Les bois pour pieux, palplanches et ouvrages sous l'eau doivent être employés le plus tôt possible après l'abatage.

CHAPITRE XVIII

CHARBONS

L'échantillon du combustible que l'on veut soumettre aux essais devant représenter la moyenne d'un lot, il est nécessaire d'apporter un soin particulier au prélèvement.

En général, dans l'industrie, on procède à l'échantillonnage dans une pièce spécialement affectée à cet usage. Le sol est recouvert de plaques de fonte planes et jointives. Des brouettées du combustible prélevées à des intervalles de temps égaux, soit sur les bateaux marchands, soit sur les wagons, sont amenées sur l'aire réservée et disposées en tas. On prend des quantités égales de matière en divers points de la masse. On en casse les morceaux les plus gros de façon à les réduire à la grosseur du poing. On étale le tout à la pelle en formant un carré de 20 centimètres d'épaisseur. De ce carré on enlève deux triangles opposés par le sommet *a* et *b* (*fig.* 94) que l'on mélange ensemble. Si le volume est considérable, on renouvelle plusieurs fois l'opération en formant chaque fois un nouveau carré. On s'arrête lorsque l'on n'a plus que 100 kilogrammes environ de matière.

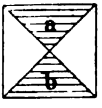

Fig. 94.— Prélèvement dans les charbons.

Les morceaux provenant de ces manipulations sont alors réduits en fragments de la grosseur d'une noisette en se servant pour cela d'un pilon en métal. On dispose à nouveau ces fragments comme il a été dit et on recommence jusqu'à ce que le prélèvement final ne comprenne que quelques kilogrammes de substance. Les morceaux sont

alors recueillis et introduits dans des flacons bouchés à l'émeri.

Lorsque l'on veut effectuer un essai, on pulvérise 500 grammes de combustible que l'on soumet aux expériences qui vont être décrites.

ANALYSE ET ESSAIS CHIMIQUES

Eau. — Cette détermination se fait différemment suivant la nature des combustibles.

Pour le coke, on opère ainsi : 100 grammes de matière concassée dont la grosseur est celle d'une noisette sont chauffés plusieurs heures dans une étuve maintenue à 150° C. La perte de poids constatée représente l'eau hygrométrique. Il convient de répéter plusieurs fois l'expérience et de prendre la moyenne des nombres obtenus.

Pour la houille on ne prend que 2 grammes de substance pulvérisée qu'on laisse pendant deux heures dans l'étuve chauffée à 100°.

Quant aux lignites et aux tourbes, il ne faut pas compter moins de six heures d'exposition à la température précédente (100°) avant d'en effectuer la pesée.

Cendres. — Dans une capsule de platine, on met 5 grammes de matière. On chauffe d'abord modérément pour éviter les projections hors du vase, puis on élève progressivement la température de manière à atteindre le rouge vif. Le résidu obtenu constitue les cendres.

Essai pour coke et parties volatiles. — Cet essai permet à l'industriel une classification sous le rapport du carbone fixe.

Un creuset de platine taré contenant 1 gramme de matière est porté au-dessus d'un brûleur à gaz à l'abri de tout courant d'air. Au bout de quelques instants on retire le creuset, qu'on laisse refroidir, puis on le pèse.

On peut aussi se servir d'une capsule de porcelaine dans laquelle on met 10 grammes du charbon. On chauffe jusqu'à

disparition de la partie éclairante que communique à la flamme du brûleur la combustion des gaz volatils. On pèse comme dans l'essai précédent.

Enfin un autre moyen consiste à employer un four à vent dans lequel on dispose six creusets de Paris chargés chacun de 200 grammes de matière.

Tous ces procédés font connaître la proportion pour 100 de coke. La différence avec le poids primitif donne la quantité de matières volatiles.

Dans certains cas, il peut être utile d'être renseigné sur la composition élémentaire d'un combustible. On effectue alors les dosages de carbone, d'hydrogène, d'azote, de phosphore et de soufre en employant avec les modifications nécessaires les procédés ordinaires de la chimie analytique.

Pouvoir calorifique. — Le pouvoir calorifique d'un charbon est la quantité de chaleur que dégage 1 gramme de cette matière lorsque sa combustion est complète. On l'exprime généralement en calories.

On emploie à cet effet l'un des procédés suivants :

1° La règle de Dulong ;

2° Le procédé Berthier ;

3° La bombe ou l'obus calorimétrique ;

4° Les essais de vaporisation.

Le premier procédé est basé sur l'hypothèse que l'eau provenant de la combustion du charbon est composée de l'oxygène existant et de la quantité d'hydrogène nécessaire à la formation de cette eau. Seul l'*hydrogène disponible*, c'est-à-dire celui qui se trouve en excès, entre en ligne de compte. La formule établie par Dulong est celle-ci :

$$Q = \frac{34.500\left(H - \frac{1}{8}O\right) + 8.080C + 2.162S}{100}.$$

Q représentant la quantité de chaleur fournie par l'unité de charbon ;

H, la teneur pour 100 en hydrogène ;

O, la teneur pour 100 en oxygène ;
C, — — carbone ;
S, — — soufre.

Les teneurs de ces gaz sont données par l'analyse élémentaire.

Dans le procédé Berthier, on admet que la quantité de chaleur que dégage un corps combustible est en raison directe de la quantité d'oxygène nécessaire pour sa combustion. Pour faire l'expérience, on chauffe au rouge vif dans un creuset en terre un mélange finement pulvérisé de 1 gramme de charbon et de 50 grammes de litharge que l'on recouvre de 25 grammes de litharge en poudre. Il se forme un culot de plomb réduit que l'on enlève après une heure de calcination. On pèse ce morceau de plomb.

La réaction est la suivante :

$$C + 2PbO = CO^2 + 2Pb.$$

Le produit du poids du plomb par le coefficient 234 (nombre de calories correspondant à 1 gramme de plomb) est considéré comme représentant le pouvoir calorifique de la matière essayée.

Il convient d'ajouter que cet essai est inexact, car la réduction de l'oxyde de plomb n'est pas due uniquement au carbone comme l'admet la formule précédente, mais aussi à l'hydrogène dont on ne tient pas compte. Or 1 gramme de plomb réduit par l'hydrogène correspond à 333 calories.

Le troisième procédé consiste dans l'emploi de la bombe Berthelot et Vieille ou de l'obus calorimétrique.

Avec la bombe la combustion du charbon a lieu en vase clos en présence de l'oxygène. Le combustible est placé dans une enceinte fermée. On fait arriver de l'oxygène sous pression et on place la bombe dans l'eau du calorimètre. On provoque la combustion et on note l'élévation successive de la température.

Pour rendre accessible aux laboratoires industriels l'usage de cet appareil, MM. Hempel et Mahler ont imaginé de remplacer le doublage intérieur en platine par des matières

moins coûteuses et ont ainsi construit de nouveaux appareils basés toutefois sur le principe de la bombe.

On se contentera de donner la description de l'obus Mahler. Cet instrument (*fig.* 95) se compose de l'obus proprement dit d'un calorimètre, d'une enveloppe isolatrice et d'un agitateur. L'obus est en acier doux; sa surface extérieure est nickelée, sa partie intérieure est en émail blanc. L'émail a la propriété de préserver l'appareil de l'action corrosive et oxydante de l'acide azotique qui se forme toujours pendant la combustion. La capacité intérieure de l'obus est de 650 cen-

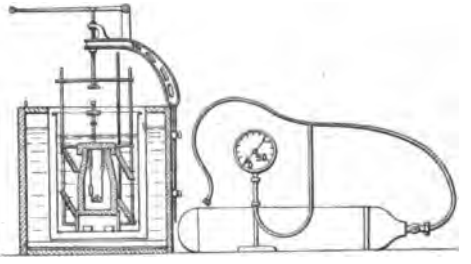

Fig. 95. — Obus Mahler.

timètres cubes; les parois ont $0^{m},008$ d'épaisseur. L'obturation de l'obus est assurée par un couvercle en fer émaillé, assujetti par une vis et une bague de plomb. Le calorimètre en laiton contient $2^{kg},200$ d'eau. On manœuvre de l'extérieur un agitateur hélicoïdal qui répartit la température d'une manière uniforme et imprime au liquide un mouvement régulier. Un récipient d'oxygène à la pression de 120 atmosphères fournit le gaz nécessaire à la combustion du charbon que l'on a placé dans une petite capsule de platine communiquant par deux fils de même métal aux pôles d'une pile. Le thermomètre est gradué en centièmes de degré.

Pour faire l'expérience, on commence par verser dans le calorimètre un volume d'eau distillée suffisant pour immerger l'obus. On pèse le combustible à essayer, on le place dans la capsule. On met l'amorce destinée à produire la combustion. On ferme l'obus, que l'on réunit au récipient à oxygène. On

laisse échapper le gaz peu à peu. On met en mouvement l'eau du calorimètre à l'aide de l'agitateur. On note la température pendant toute la durée de l'essai. Quand la température est devenue stationnaire, on retire l'obus du calorimètre, on s'assure que tout le charbon a brûlé, on dose l'acide azotique restant au moyen d'une solution titrée de baryte ou de soude.

On a ainsi une série d'observations que l'on peut mettre sous la forme suivante indiquée par M. G. Arth [1] :

EXPÉRIENCE CALORIMÉTRIQUE AVEC LES CALCULS

HOUILLE

Eau dans le calorimètre....	2.200 gr.	Vase + capsule Pt +	8gr,9535
Poids en eau : (Obus + vase + agitateur + thermomètre).....	494 —	Vase + capsule Pt + pastille +	7 ,9402
Poids en eau total.....	2.694 gr.	Houille pesée =	1gr,0133

Combustion du fer : q = 0c,02841
HAzO3 = 0gr,143 : q' = 0c,03289
$q + q'$ = 0c,06130

10h45	— 0′	— 10°,960	
	1	— 10°,960	
	2	— 10°,960	
	3	— 10°,960	
	4	— 10°,960	
	5	— 10°,960	Temp. moy. : 12°,23 — + 0°,0033
	—		— 13°,76 — + 0°,0074
	6	— 13°,500	— 14°,03 — + 0°,0080
	7	— 14°,020	
Maxim.	8	— 14°,040	Total : + 0°,0187
	9	— 14°,035	
	10	— 14°,025	
	11	— 14°,018	
	12	— 14°,010	
	13	— 14°,000	Excès lu : = 14°,040 — 10°,960 = + 3°,080
	14	— 13°,996	Correction de refroidissement = + 0°,0187
	15	— 13°,982	
	16	— 13°,977	Excès corrigé : + 3°,0987
	17	— 13°,966	
	18	— 13°,960	Q = 3°,0987 × 2,694 = + 8c,3478
			Correction pour Fe et HAzO3 = + 0c,0613
			Q corrigé : + 8c,2865

Refroidissement moyen avant = 0°
— — après = $\frac{0°,080}{10}$ = + 0°,008

Q par gramme = 8c,177

1. G. Arth, *Recueil de procédés de dosages*, 1897.

La combinaison des résultats des observations avant et après peut se résumer en un diagramme comme il est indiqué (*fig.* 96). Les températures observées sur le thermomètre depuis l'origine sont portées en abscisses. On porte en ordonnées à l'origine la valeur du refroidissement moyen avant (0° dans l'exemple choisi), et à la température du maximum la valeur du refroidissement moyen après (0°,008). On a ainsi la courbe des corrections relatives à chaque température.

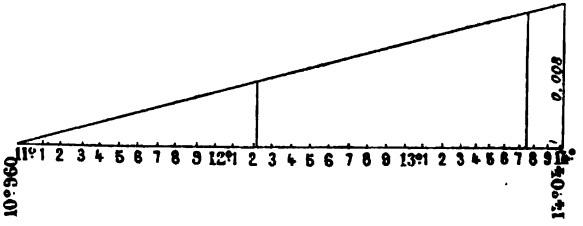

Fig. 96. — Diagramme.

On calcule la quantité de chaleur dégagée Q d'après la relation :

$$Q = P \times e,$$

P désignant le poids total en eau du système, et e l'excès corrigé.

De ce nombre Q on déduit la quantité de chaleur dégagée par la combustion du fer et celle qui résulte de la formation d'acide azotique. Pour cela on sait que la combustion de 1 gramme de fer nécessite $1^{cal},6$ et que 1 gramme d'acide azotique dilué demande $0^{cal},21$ pour se former.

Le nombre Q ainsi rectifié, rapporté à 1 gramme de substance, représente le pouvoir calorifique du combustible.

Si dans le charbon il y avait une quantité assez considérable de soufre, il conviendrait de tenir compte de l'acide sulfurique qui se formerait. On doserait alors cet acide et on lui attribuerait la part voulue dans l'acidité totale. Dans les

essais industriels, il est rare qu'il y ait lieu de faire cette correction.

Enfin, il existe un quatrième procédé de détermination du pouvoir calorifique basé sur un essai direct fait à l'aide d'une chaudière à vapeur et de bassins destinés à mesurer le volume d'eau introduit dans cette chaudière. L'expérience se fait en employant un combustible dans des conditions de grosseur et de siccité analogues à celles de la pratique. Le résultat s'exprime en calories ou en unités de vapeur.

Cet essai est peu usité en France.

ESSAIS PHYSIQUES

Poids spécifique réel. — Pour cette détermination on se sert de la *méthode du flacon*. On opère sur de la poudre bien sèche et on emploie comme véhicule de l'eau ou de l'alcool, en ayant soin de provoquer l'expulsion des bulles d'air adhérant aux parois du vase ou à la matière.

Poids spécifique apparent. — Il s'obtient au moyen de la balance hydrostatique. On recouvre préalablement le charbon d'une mince couche de paraffine ou de vernis.

Porosité. — La porosité se déduit des poids spécifiques réel et apparent D et d :

$$V = \frac{D - d}{d}.$$

Elle peut aussi s'obtenir directement par l'immersion de la substance dans l'eau.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

On admet que 1 kilogramme de houille de bonne qualité dégage 7.500 calories. D'autre part, 1 kilogramme d'eau absorbe 650 calories de chaleur latente pour se transformer en vapeur à 100°. Donc, théoriquement, 1 kilogramme de houille devrait produire $\frac{7.500}{650}$, c'est-à-dire $11^{kg},538$ de vapeur d'eau. Pratiquement, on ne doit guère compter que sur un rendement de $6^{kg},5$ à 10 kilogrammes de vapeur d'eau.

La teneur en cendres d'un bon coke ne doit pas dépasser 5 à 8 0/0.

Le poids moyen de l'hectolitre de houille est de 79 kilogrammes et celui de l'hectolitre de coke de 39 kilogrammes.

Les pouvoirs calorifiques des divers combustibles solides sont indiqués ci-dessous (E. Hospitalier) :

	Calories (kg-d) par kilogr.
Charbon de Cardiff (4 0/0 de cendres).....	8.700
Anthracite de Swansea (4,5 0/0 de cendres)....	8.500
Coke de Nœux (6 0/0 de cendres).....	7.300
Coke de pétrole.....	8.057
Cellulose	4.200
Charbon de bois fortement calciné.....	8.080
Charbon de bois ordinaire.....	7.000
Graphite des hauts fourneaux.....	7.762
Tannée (48 0/0 eau et 10 0/0 cendres).....	1.356

M. Grüner classe les houilles en cinq catégories :

1° Houilles sèches à longue flamme;
2° Houilles grasses à longue flamme;
3° Houilles grasses;
4° Houilles grasses à courte flamme ;
5° Houilles maigres.

Il a procédé pour chacune d'elles aux déterminations suivantes :

TYPES	COKE en p. 100 de houille pure	MATIÈRES VOLATILES en p. 100 de houille pure	NATURE ET ASPECT DU COKE	POUVOIR CALORIFIQUE en calories (kg-d) par kilogramme	EAU VAPORISÉE à 117° en kilogrammes par kilogramme de houille
1° Houilles *sèches* à longue flamme.....	55-66	45-40	Pulvérulent ou légèrement fritté.	8.000-8.500	6,7-7,5
2° Houilles *grasses à longue flamme* (charbons à *gaz*)..	60-68	40-32	Complètement aggloméré, le plus souvent fondu, poreux.	8.500-8.800	7,6-8,3
3° Houilles grasses (charbon de *forge*).....	68-74	32-26	Fondu et plus ou moins boursouflé.	8.800-9.300	8,4-9,2
4° Houilles *grasses à courte flamme*.....	74-82	26-18	Fondu, compact.	9.300-9.600	9,2-10
5° Houilles *maigres* ou anthraciteuses.....	82-90	18-10	Légèrement fritté ou pulvérulent.	9.200-9.500	9-9,5

CHAPITRE XIX

CHAUX ET CIMENTS. — TRASS ET POUZZOLANES

I. — CHAUX ET CIMENTS

Par leur calcination, les calcaires fournissent, suivant leur teneur en carbonate de calcium, des chaux grasses, des chaux maigres, des chaux hydrauliques ou des ciments.

Les chaux grasses proviennent de la cuisson de calcaires à peu près purs.

Les chaux maigres sont le résultat de la calcination de calcaires contenant peu d'impuretés ; ces impuretés consistent en oxyde ferrique, en magnésie et en argile, cette dernière substance se trouvant d'ailleurs en assez faible proportion.

Ces deux variétés constituent les chaux aériennes.

Les chaux hydrauliques résultent de la cuisson de calcaires plus ou moins argileux.

Enfin, si l'on porte à une température convenable des calcaires très argileux, on obtient des ciments.

Chaux aériennes. — La chaux grasse est blanche. Si on l'humecte d'eau, elle se gonfle et *s'éteint* en produisant un notable dégagement de chaleur; la poudre obtenue est de l'hydrate de calcium. La chaleur qu'elle dégage est susceptible de porter à 400° un corps plongé dans sa masse. Cette matière est douce, onctueuse ; elle forme avec l'eau une pâte grasse et liante. D'après Vicat, 100 parties de chaux grasse absorbent pour la solidification 74 parties d'anhydride carbonique et retiennent 17 parties d'eau. La chaux grasse s'emploie avec succès dans les maçonneries aériennes. Elle

durcit à l'air en lui empruntant une partie de son gaz carbonique. Placée sous l'eau dans un vase et privée d'air et d'acide carbonique, elle se conserve indéfiniment molle.

La chaux maigre est généralement grise. A l'extinction, elle dégage moins de chaleur que la chaux grasse; son volume reste sensiblement le même. Avec l'eau, elle forme une pâte courte et peu liante; elle se désagrège facilement. On l'emploie aux mêmes fins que la chaux grasse.

Dans les travaux publics, principalement pour les ouvrages d'art, on fait un usage assez restreint de ces chaux aériennes; on utilise plutôt les agglomérants hydrauliques, qui se divisent en deux grandes catégories : les chaux hydrauliques et les ciments.

Prise et durcissement des agglomérants hydrauliques. — L'étude de la prise et du durcissement des agglomérants hydrauliques a donné lieu, tant en France qu'à l'étranger, à beaucoup d'hypothèses et de controverses.

On va rappeler ci-après d'une façon succincte les principales théories basées sur les phénomènes observés.

Fuchs dit que le durcissement du ciment doit être attribué à la formation d'un silicate de calcium.

Winkler admet une séparation de la chaux et de l'eau, puis une combinaison terminale de $Ca^3Si^3O^9$ et de $CaAl^2O^4$ dont le deuxième terme est décomposé par l'acide carbonique.

Feichtinger attribue la solidification du ciment à une combinaison chimique qui se produirait entre le calcium et la silice et entre le calcium et les silicates formés.

Rivot et Chatoney pensaient que la cuisson du calcaire argileux avait pour conséquence l'obtention d'un aluminate de calcium et d'un silicate de calcium. La présence de ces deux sels devait provoquer avec l'eau la formation d'hydrates. C'est, en somme, un effet d'hydratation analogue à celui que l'on constate pour la prise du plâtre.

Si l'on s'en rapporte à *Frémy*, on devrait attribuer à l'action de la chaux caustique sur les silicates la cause unique de la prise et du durcissement des mortiers.

Zulkowsky croit que le ciment Portland est un mélange d'un hydraulite et de chaux caustique.

MM. *Newberry* proposent de donner à ce même ciment la formule :

$$x\,(3CaOSiO^2) + y\,(2CaOAl^2O^3).$$

Törnebŏhm prétend que le ciment solidifié se compose de quatre minéraux qu'il a ainsi désignés :

alite $x\,(3CaOSiO^2) + 9CaO2Al^2O^2$,
bélite $x\,(2CaOSiO^2) + 3CaOAl^2O^3$,
célite $3Ca\,(FeAl)^2O^32SiO^2$,
félite de composition non déterminée,
et d'un résidu vitreux.

Dans la solidification, c'est seulement l'alite qui a un rôle actif. Cette substance n'est attaquée qu'à l'extérieur en raison de la production d'une matière gélatineuse qui entoure ses grains et joue le rôle d'un revêtement protecteur. Il y a deux formations : la première, $2\,(CaSiO^2)$, est une masse amorphe devenant cristalline au bout d'un certain temps; la seconde cristallise sous forme d'écailles incolores d'hydrate de calcium.

M. *H. Le Chatelier* ramène le durcissement à la transformation au contact de l'eau d'un silicate de calcium basique en silicate hydraté et en hydrate de calcium :

$$(CaO)^3\,SiO^2 + aq. = CaOSiO^2 2{,}5H^2O + 2\,(CaO)\,H^2O.$$

Il se forme, en outre, un aluminate de calcium basique dont la rapide hydratation exerce sans doute une action sur

la vitesse de prise des différents ciments. La formule de réaction est la suivante :

$$(CaO)^3Al^2O^3 + CaOH^2O + aq. = (CaO)^4Al^2O^312H^2O.$$

M. Le Chatelier pense que dans un bon ciment la proportion de chaux ne doit pas être inférieure au minimum correspondant à l'égalité :

$$\frac{CaO + MgO}{SiO^2 + Al^2O^3} = 3,$$

ni supérieure au maximum donné par la formule :

$$\frac{CaO + MgO}{SiO^2 + Al^2O^3 + Fe^2O^3} = 3,$$

les symboles chimiques représentant dans ces rapports des nombres d'équivalents et non des poids.

Indice d'hydraulicité. — La plus ou moins grande quantité des deux éléments actifs, le silicate et l'aluminate de calcium, détermine naturellement dans les produits hydrauliques une vitesse de prise différente. C'est ce qui avait donné à Vicat l'idée d'établir une classification basée, d'une part, sur l'indice d'hydraulicité, c'est-à-dire sur le rapport de la silice et de l'alumine (dont la réunion est souvent, mais improprement, appelée argile, quoique ce corps n'existe plus en cet état) à la chaux anhydre, et, d'autre part, sur la durée de la prise.

Cette classification est résumée dans le tableau de la page 248, établi par M. Durand-Claye, et comportant la classification suivante :

1° Nature des produits ;
2° Indice d'hydraulicité ;
3° Teneur correspondante à la silice, l'alumine (argile) des calcaires supposés purs ;
4° Durée de prise.

NATURE DES PRODUITS	INDICE D'HYDRAULICITÉ	TENEURS CORRESPONDANTES A LA SILICE plus l'alumine (argile) des calcaires supposés purs	DURÉE DE PRISE
Chaux grasse ou maigre	0,00 à 0,10	0,0 à 5,3	plus de 30 jours
— faiblement hydraulique	0,10 à 0,16	5,3 à 8,2	du 16e au 30e jour
— moyennement hydraulique	0,16 à 0,31	8,2 à 14,8	du 10e au 15e jour
— hydraulique proprement dite	0,31 à 0,42	14,8 à 19,1	du 5e au 9e jour
— éminemment hydraulique	0,42 à 0,50	19,1 à 21,8	du 2e au 4e jour
— limite ou ciment à prise lente	0,50 à 0,65	21,8 à 26,7	de 10' à 18 heures
Ciment à prise rapide	0,65 à 1,20	26,7 à 40,0	de 2' à 10 heures
— maigre	1,20 à 3,00	40,0 à 62,6	—
Pouzzolane	au-dessus de 3,00	au-dessus de 62,6	—

Il convient d'ajouter que l'indice qui, avec Vicat, était représenté par le rapport:

$$I = \frac{SiO^2 + Al^2O^3}{CaO},$$

est parfois remplacé par le rapport suivant:

$$I = \frac{SiO^2 + Al^2O^3}{CaO + MgO},$$

depuis que l'on a reconnu que la magnésie jouait un rôle actif dans l'hydraulicité des produits.

En France, on exprime quelquefois la composition par le rapport de l'argile à 100 parties du produit total et plus rarement par le rapport à 100 parties de matières calcinées.

Les Allemands se servent du poids de chaux combinée à une partie du résidu argileux.

Enfin, pour être logique, on devrait dans ces calculs retrancher la chaux combinée à l'acide sulfurique pour former le sulfate de calcium. Il est assez rare que l'on tienne compte de cette remarque.

Chaux hydrauliques. — La classification de Vicat, en usage jusqu'à ces dernières années, tend à disparaître. C'est ainsi qu'il est de pratique courante de distinguer maintenant les chaux hydrauliques en chaux légères et en chaux lourdes.

Les chaux légères ont un poids qui varie de $0^{kg},500$ à $0^{kg},650$ par litre ; leur indice est généralement inférieur à 0,30.

Les chaux lourdes ont un poids supérieur à $0^{kg},700$ par litre ; leur indice est compris entre 0,31 et 0,50.

Il est à remarquer que l'indice ne correspond pas toujours à la durée de prise indiquée dans le tableau ci-dessus. Sous ce rapport la teneur en alumine et la surveillance exercée pendant la fabrication ont une influence manifeste sur la nature du produit obtenu. D'ailleurs, il ne faut pas perdre de vue que de l'homogénéité des bancs dépend en grande partie la constance dans les produits fabriqués.

Les incuits provenant d'une insuffisance de cuisson se reconnaissent à leur couleur et à leur légèreté. Quant aux surcuits, ils constituent ce qu'on appelle les grappiers; ils proviennent de chaux ayant leur indice compris entre 0,30 et 0,40. A la température à laquelle le calcaire a été porté, la silice s'est combinée à la chaux pour former un silicate tricalcique. S'il y a encore de la chaux libre, il faut l'éteindre par un arrosage supplémentaire ou la laisser longtemps à l'air (pendant une année par exemple) afin d'être certain que l'extinction est complète. Les grappiers provenant de chaux dont l'indice est supérieur à 0,40 forment des ciments naturels; ce sont les chaux limites de Vicat. Il faut s'en méfier pour l'emploi, car, si on se contente de les réduire en poudre, on peut se préparer des mécomptes pour l'avenir en raison de la chaux libre que très souvent ils renferment.

Dans le Sud-Est de la France, en Belgique et en Suisse, on fabrique de la chaux dont le poids atteint 1 kilogramme par litre; cette chaux lourde s'obtient en broyant entièrement la chaux dont l'extinction a été plus ou moins prolongée.

Il n'existe pour toute la France et l'Algérie que trois usines principales employant le procédé de la double cuisson pour la fabrication de la chaux hydraulique artificielle. Ce sont les usines d'Issy-les-Moulineaux (près de Paris), d'Haubourdin (près de Lille) et de Rivet (près d'Alger).

La chaux obtenue doit être très fine. Elle ne doit laisser aucun résidu sur le tamis à 324 mailles, 2 à 3 0/0 sur le tamis à 900 mailles et un résidu inférieur à 20 0/0 sur le tamis à 4.900 mailles.

Ciments. — Il existe des ciments naturels et des ciments artificiels.

Ciments naturels. — Parmi les ciments naturels, on distingue les ciments prompts et les ciments lents ou demi-lents.

Les ciments prompts ont été les premiers connus. Les principaux d'entre eux sont ceux de Vassy, de l'Isère, des environs de Marseille (la Bédoule, Roquefort, la Valentine), du Lot, du Lot-et-Garonne, de la Dordogne, de la Porte de France (Grenoble), etc.

Les ciments romains, c'est-à-dire ceux qui ont un indice élevé, sont cuits à température modérée. Ils se fabriquent en quantité considérable aux États-Unis (Rosendale), en Autriche et en Russie. Ils contiennent généralement une assez forte proportion de magnésie.

Les ciments prompts ont une densité plus faible que celle des autres ciments. Ils ont une couleur variant du jaune clair au jaune brun. La teinte claire qu'ils possèdent au moment du gâchage devient brun foncé après le durcissement ; cela tient à la mise en liberté de l'oxyde ferrique. Le ferrite de chaux contenu dans le ciment en poudre est peu à peu décomposé à l'air ; la chaux s'empare de l'acide carbonique et le fer devient libre.

Les calcaires à ciment prompt ont une teneur en argile variant de 25 à 35 0/0. La proportion d'alumine est assez élevée ; pour le ciment cuit, elle atteint 8 et même 12 0/0.

Les ciments lents et demi-lents proviennent de calcaires cuits à plus haute température que les ciments prompts. Pour ralentir la prise, on ajoute parfois, après mouture, une quantité convenable de grappiers de chaux hydraulique. Les ciments du Valbonnais (Isère) et d'Allas (Dordogne) sont des exemples de ciments lents. Le séjour en silos de ces ciments doit être assez prolongé.

Ciments artificiels. — Quant aux ciments artificiels, ils sont de deux sortes : les ciments Portland et les ciments de laitier.

Les usines Vicat (Grenoble) et Dupont et Demarle (Boulogne-sur-Mer) sont les types du genre de fabrication du ciment Portland. Les usines les plus importantes sont situées aux États-Unis. Dans la classification de Vicat, l'indice de ces produits est voisin de 0,44. Quant au rapport de la chaux à la silice, à l'alumine et à l'oxyde ferrique, il est le plus souvent égal ou très rapproché du nombre 2.

Certains sels ajoutés soit à l'eau de gâchage, soit au ciment, ont pour effet d'accélérer ou de retarder la prise. Ainsi les carbonates de potassium et de sodium activent la prise, tandis que le chlorure et le sulfate de calcium la ralentissent. C'est pourquoi, en hiver, il n'est pas rare d'ajouter du carbonate de sodium lorsqu'il fait un grand froid.

Le durcissement du ciment croît rapidement pendant la première semaine ; il atteint les 2/3 de la résistance finale. A partir de la fin de la quatrième semaine, il y a ralentissement, et enfin, au bout d'un mois, on trouve à peu près les mêmes résultats qu'au bout de plusieurs années. Il faut d'ailleurs se rappeler que les ciments présentent entre eux une notable différence. Tel ciment atteint beaucoup plus vite son maximum de résistance que tel autre, mais en général on admet qu'un accroissement rapide de résistance est l'indice d'un ciment de bonne qualité. Certains ciments atteignent cependant, au bout de quelques jours, un degré de résistance remarquable, puis se délitent et finissent par se détruire complètement au bout de quelques années. Cela est dû à la présence de la chaux libre qui finit par s'éteindre et provoque un gonflement inévitable lors de sa lente extinction. Une proportion de 1 0/0 de chaux libre est toujours à redouter.

La fabrication des ciments de laitier a pris naissance d'abord en Allemagne, il y a une vingtaine d'années, puis en France. Ces ciments se composent de laitier de haut fourneau mélangé à de la chaux grasse ou hydraulique. Le laitier est granulé par refroidissement brusque dans l'eau, immédiatement à sa sortie du haut fourneau. Il se présente alors sous forme de grains d'aspect vitreux qu'on pulvérise très finement au moyen du tube broyeur.

D'après M. Tetmajer, le rapport de la chaux à la silice ne doit pas descendre au-dessous de 1 et le rapport de la silice à l'alumine doit être compris entre 0,45 et 0,50. Le mélange se fait souvent dans la proportion d'environ 35 parties de chaux et de 65 parties de laitier.

Le ciment de laitier ne doit pas laisser de résidu supérieur à 10-15 0/0 sur le tamis à 4.900 mailles sous peine de perdre de sa valeur. Il est de prise assez lente. Sa résistance est très satisfaisante. Il se recommande plutôt dans les travaux hydrauliques que dans les constructions aériennes.

ANALYSE CHIMIQUE

Étant donnée l'importance qui s'attache à l'emploi des matériaux hydrauliques dans la construction des ouvrages d'art, il est indispensable pour tout constructeur de savoir à quoi l'on reconnaît la bonne et la mauvaise qualité de ces produits.

Au premier rang des essais de réception des matériaux hydrauliques se place l'analyse chimique.

Les éléments que l'on détermine couramment dans les chaux et dans les ciments sont les suivants :

Silice, *alumine*, *oxyde ferrique*, *chaux*, *magnésie*, *anhydride sulfurique*, *alcalis*, *perte au feu*.

Ils s'y trouvent soit à l'état libre, soit à l'état de combinaison.

Les ciments, et quelquefois les chaux, renferment en outre du soufre à l'état de sulfure ou à l'état de sulfate. D'autres corps peuvent encore se trouver accessoirement dans ces produits. Ce sont principalement de l'oxyde de manganèse, des matières charbonneuses ou bitumineuses, etc.

L'eau, l'anhydride carbonique et les autres matières volatiles constituent par leur réunion la *perte au feu* ou *perte au rouge*.

Les dosages de ces divers corps s'effectuent dans l'ordre suivant :

Silice. — Dans une capsule en porcelaine, on attaque 2 ou 3 grammes de matière pulvérisée par de l'acide chlorhydrique étendu. On évapore à sec. Sous l'influence de la chaleur, la silice, d'abord gélatineuse, se dessèche peu à peu.

Le résidu blanc obtenu est repris par l'acide chlorhydrique étendu. La silice, restée seule insoluble, est filtrée, desséchée, calcinée et pesée.

Alumine et oxyde ferrique. — La liqueur filtrée provenant de l'opération précédente est portée à l'ébullition. L'oxyde ferreux passe à l'état d'oxyde ferrique. On ajoute de l'ammo-

niaque. Il y a précipitation de l'alumine et de l'oxyde ferrique. Après refroidissement, on recueille le précipité sur un filtre, on le dessèche, on le calcine et on le pèse.

Chaux. — Dans le liquide filtré, on verse une solution d'oxalate d'ammonium. La chaux se précipite à l'état d'oxalate de calcium. On dessèche, puis on calcine le précipité pendant dix minutes à la température du soufflet d'émailleur. On obtient ainsi de la chaux caustique CaO.

On peut aussi calciner le précipité à une température moins élevée telle que celle donnée par une lampe à alcool. Le produit obtenu est alors du carbonate de calcium. Ce dernier mode opératoire est parfois préféré au précédent.

Magnésie. — Au liquide filtré précédent on ajoute un peu de solution de phosphate de sodium. Il se produit un précipité de phosphate ammoniaco-magnésien qui, séparé et calciné, donne du pyrophosphate de magnésium duquel on déduit la teneur en magnésie.

Perte au feu. — La perte au feu s'obtient en soumettant dans un creuset de platine, pendant dix minutes environ, quelques grammes de matière pulvérisée à la température du rouge vif. La différence des pesées donne la perte au feu, qui comprend, outre l'eau et l'anhydride carbonique, les autres matières volatiles pouvant exister dans le produit.

Anhydride sulfurique. — Ce corps se dose surtout dans les ciments. 2 ou 5 grammes de l'échantillon à analyser sont mis en digestion avec une solution de carbonate d'ammonium. Il y a double décomposition avec formation de carbonate de calcium insoluble et de sulfate d'ammonium soluble. Par filtration, on sépare le sulfate d'ammonium que l'on traite par du chlorure de baryum. Il se produit du sulfate de baryum insoluble que l'on recueille et que l'on pèse en cet état après calcination.

On peut encore opérer ainsi. Après séparation de la silice, comme il a été indiqué plus haut, on ajoute dans la liqueur filtrée du chlorure de baryum. On a, comme ci-dessus, un précipité de sulfate de baryum que l'on calcine et que l'on pèse.

Si l'on veut doser séparément l'acide sulfurique préexistant dans le ciment et l'acide sulfurique provenant du plâtre qui a pu être ajouté, on utilise la différence de densité et on sépare la partie surnageante qu'on analyse séparément. On peut ainsi aisément calculer la fraction afférente au plâtre qui constitue la portion qui surnage.

Alcalis. — Le dosage des alcalis fixes (potasse et soude) se fait en suivant tout d'abord la marche ordinaire de l'analyse telle qu'elle vient d'être décrite, c'est-à-dire que l'on sépare successivement la silice, l'alumine, l'oxyde ferrique et la chaux. On évapore à sec la liqueur provenant de la filtration du précipité d'oxalate de calcium. On calcine sur un brûleur, ce qui amène la décomposition des oxalates. Le résidu est composé de sels alcalins, de magnésium et de carbonate de magnésium. Ces deux derniers corps sont insolubles, de sorte qu'en reprenant par l'eau et en filtrant on a une liqueur uniquement composée de sels alcalins. Cette liqueur est évaporée à sec en présence d'un peu d'acide sulfurique. On a du sulfate alcalin que l'on chauffe au rouge vif et que l'on pèse. On rend la liqueur acide par l'addition d'un peu d'acide chlorhydrique ; on ajoute du chlorure de baryum qui donne lieu à un précipité de sulfate de baryum que l'on calcine et que l'on pèse. Ce poids donne, par un simple calcul, la proportion correspondante d'anhydride sulfurique. Cette quantité, retranchée du poids du sulfate alcalin précédemment trouvé, donne le poids des deux alcalis.

On peut encore doser les alcalis d'une autre façon. On prend le produit cuit ou préalablement porté à 1.200°. On met cette matière en suspension dans l'eau, en agitant de temps à autre pour éviter toute agglomération. On laisse ainsi la matière pendant huit jours. On filtre la liqueur contenant la chaux et les alcalis. On précipite la chaux par un courant de gaz carbonique et on continue à faire passer le courant gazeux jusqu'à ce que la teinte rouge obtenue en ajoutant de la phénolphtaléine ait totalement disparu. On porte la liqueur quelques instants à l'ébullition pour décomposer le bicarbonate formé. Quand une couleur rose se manifeste, on arrête l'ébullition ; on filtre et on dose les alcalis par la méthode volumétrique (H. Le Chatelier).

Chaux libre. — Le ciment finement pulvérisé, mis en suspension dans l'eau, est agité dans un petit broyeur à boulets. La quantité d'eau employée doit être telle qu'elle contienne en fin d'opération un décigramme environ de chaux par litre. La totalité de la chaux libre est alors passée en solution, tandis que la chaux combinée est restée insoluble parce que les silicates, aluminates et ferrites ne se décomposent qu'en présence de solutions beaucoup plus diluées. Par la méthode alcalimétrique, on titre la chaux dissoute.

On détermine quelquefois cet élément en versant dans un ballon 250 centimètres cubes d'eau sucrée à 10 0/0 et 5 grammes de ciment. Après une demi-heure de repos on filtre. Dans la liqueur filtrée on dose la chaux par le procédé pondéral ou alcalimétrique.

Il y a souvent intérêt à effectuer la séparation de l'alumine et de l'oxyde ferrique, ainsi que celle de l'eau et de l'anhydride carbonique. On procède alors de la façon suivante :

Séparation de l'alumine et de l'oxyde ferrique. — Le précipité total d'alumine et d'oxyde ferrique, obtenu par une opération préalable, est redissous dans de l'acide chlorhydrique. On additionne la liqueur d'une quantité d'acide tartrique ou d'acide citrique suffisante pour empêcher la précipitation par l'ammoniaque que l'on ajoute ensuite. Dans le liquide ammoniacal on verse du sulfure d'ammonium. On a un précipité de sulfure de fer que l'on recueille, que l'on calcine et que l'on pèse à l'état d'oxyde ferrique.

L'alumine se déduit par différence. On pourrait d'ailleurs la doser directement.

Séparation de l'eau et de l'anhydride carbonique. — Cette séparation se fait de diverses manières. On emploie fréquemment pour la détermination de l'anhydride carbonique l'appareil de Berzélius et de Rose. Le dégagement de ce gaz et de la vapeur d'eau entraînée s'effectue lorsque l'on verse de l'acide chlorhydrique sur le produit. L'eau est retenue au passage par une matière desséchante (chlorure de calcium

ou pierre ponce imbibée d'acide sulfurique). La différence entre le poids de l'appareil avant et après réaction représente la teneur en anhydride carbonique.

Si de la perte au feu on retranche l'anhydride carbonique et, s'il y a lieu, les matières organiques, on a la teneur en eau.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'analyse chimique ainsi faite donne la composition élémentaire de la substance soumise à l'essai. Mais, pour les raisons déjà indiquées, il est prudent de ne pas essayer de faire des groupements hypothétiques, puisqu'on ne connaît pas exactement les combinaisons chimiques que forment entre eux les divers éléments. On va voir ci-après quelle est la valeur que l'on doit attribuer à chaque constituant.

Silice. — Tous les calcaires hydrauliques contiennent de la silice. Par la cuisson, l'argile, matière inerte, se décompose, et la silice, mise en liberté, devient alors un corps chimiquement attaquable, constituant la véritable matière hydraulisante.

La proportion de cet acide est très variable. La chaux du Teil en renferme normalement de 23 à 24 0/0. D'autres chaux hydrauliques proprement dites en contiennent beaucoup moins : 13 0/0. Certains ciments en possèdent de 18 à 29 0/0. La teneur en silice prise isolément ne fournit donc pas la caractéristique d'un produit hydraulique.

Alumine. — La présence de ce corps ne peut pas être non plus considérée comme indispensable à l'hydraulicité des produits, puisque de bonnes chaux, comme celle du Teil, en contiennent très peu. Néanmoins, il existe, le plus souvent, une relation entre la proportion de la silice et celle de l'alumine. Quand la teneur en alumine dépasse une certaine limite, l'excès de cet oxyde reste inerte; au contraire, une teneur peu élevée exerce une action favorable sur l'hydraulicité des produits.

Oxyde ferrique. — Ce composé est considéré comme inerte dans les chaux hydrauliques. S'il existe en assez forte proportion, il communique aux produits une teinte variant du

blanc jaunâtre au blanc rougeâtre suivant son degré d'oxydation et suivant son importance. La chaux du Teil, qui contient peu d'oxyde ferrique, est blanche. Si la matière se trouve à l'état d'oxyde ferreux, elle concourt pour une petite partie à la solidification du produit.

Chaux. — De même que pour la silice, la quantité de chaux est très variable. Le dosage que l'on effectue dans la généralité des cas est celui de la chaux totale. Plus rarement, on fait celui de la chaux libre, quoiqu'on attribue à cette base les bons effets constatés dans la résistance des mortiers à la mer, en raison de la formation d'un revêtement protecteur dû à la combinaison de l'anhydride carbonique contenu dans l'eau salée avec la chaux. Ce revêtement résiste parfaitement à l'action dissolvante du sulfate de magnésium.

Magnésie. — L'action exercée par cette base est différente suivant la nature du produit hydraulique.

Dans les ciments, on considère plutôt la présence de la magnésie comme funeste par suite des gonflements qui se manifestent postérieurement à la prise, lorsque sa proportion est trop considérable. Si elle ne s'y trouve qu'en assez faible quantité, elle peut en partie se substituer à l'alumine.

En ce qui concerne les chaux, la magnésie, en teneur importante, donne lieu à une double combinaison entre ce corps, l'alumine et la silice d'une part, et entre l'alumine, la silice et la chaux d'autre part. Chaque combinaison ayant un moment de prise différent, il en résulte une hétérogénéité dans la masse des maçonneries amenant la décomposition ou la destruction de celles-ci par suite des mouvements qui en sont la conséquence. Pour les mortiers soumis à l'action de la mer, ces inconvénients sont encore aggravés par les réactions chimiques qui se forment lors de l'introduction de sels par les fissures produites.

Les chaux provenant de la cuisson de calcaires magnésiens donnent d'ailleurs avec l'eau une pâte courte et mal liée. Une teneur de 10 0/0 en magnésie rend la chaux maigre. Avec 25 ou 30 0/0 de la même base, la chaux devient impropre aux usages de la construction.

Anhydride sulfurique. — Une trop forte teneur de ce corps

est dangereuse. On sait que l'eau de mer au contact de mortiers ayant contenu du plâtre (sulfate de calcium) donne lieu à des décompositions. Les Allemands admettent une limite maximum de 2 0/0. En tout cas, une proportion de 4 0/0 doit faire refuser un produit.

La façon dont se comporte cet élément diffère suivant que son addition ou sa présence a précédé ou suivi la cuisson. Quelques centièmes de plâtre ou de gypse ont pour effet de ralentir considérablement la prise du ciment et d'augmenter la résistance. Si un mortier est fait avec un ciment qui contient beaucoup de plâtre, il se gonfle et donne naissance à des fissures. L'hydratation du sulfate de calcium est, en effet, postérieure à celle de la chaux contenue dans le produit. La solubilité dans l'eau du sulfate de calcium (2^{gr},14 par litre d'eau à 38°) est encore un autre inconvénient.

Quand le produit naturel contient des pyrites de fer, sa cuisson donne lieu à la formation de sulfates quand les pyrites ont été en contact avec des gaz oxydants. Dans le cas de gaz réducteurs ou inertes, il y a des sulfures qui sont non moins dangereux, parce qu'ils se trouvent dans un état d'instabilité ; ces sulfures passent facilement à l'état de sulfates.

Alcalis. — Une petite quantité d'alcalis fixes que l'on trouve dans les produits calcinés provient des calcaires naturels, des argiles servant à la fabrication des chaux et des ciments ou encore des cendres des combustibles nécessaires à la cuisson. En faible proportion, ils exercent une action favorable sur les liants hydrauliques ; certains auteurs admettent même qu'une petite quantité de carbonate de potassium ou de sodium variant de 0,50 à 1,00 devrait être obligatoirement ajoutée.

Perte au feu. — Une forte perte au feu est l'indice d'un éventement probable. Un produit, abandonné à lui-même, absorbe l'humidité et l'anhydride carbonique de l'air, car la cuisson élimine en grande partie les matières volatiles. L'attention devra donc être attirée lorsqu'une proportion trop considérable du résultat de la calcination (plus de 10 0/0 par exemple) aura été constatée. Une revivification du produit serait alors nécessaire.

M. Le Chatelier fournit dans le tableau suivant la proportion

des éléments entrant dans la composition des produits hydrauliques :

NATURE DES PRODUITS	SILICE	ALUMINE	OXYDE FERRIQUE	CHAUX	MAGNÉSIE	ANHYDRIDE SULFURIQUE	EAU ET ANHYDRIDE carbonique
Meilleures chaux hydrauliques [1]	22	2	1	63	1,5	0,5	10
Ciments de grappiers	26,5	2,5	1,5	63	1	0,5	5
Ciments naturels à prise rapide	22 à 24	7 à 10	1 à 5	45 à 55	1 à 5	2 à 4	4 à 8
Ciments portland marchands de bonne qualité	21 à 24	6 à 8	0,5 à 2	60 à 65	0,5 à 2	0,5 à 1,5	1 à 3
Ciments de laitier de bonne qualité	24	14	1	51	2	1	7

1. Pour les chaux de qualité inférieure, la teneur en silice peut s'abaisser à la moitié de la valeur indiquée dans le tableau, et même l'eau et parfois l'alumine peuvent doubler ; la teneur en chaux reste toujours à peu près la même et varie entre 55 et 65 0/0.

PRATIQUE DES ESSAIS

Les essais que l'on peut effectuer sur les chaux et ciments sont relativement nombreux. Mais, si certains d'entre eux sont d'une utilité générale, d'autres ne sont employés que dans des cas particuliers. Il en est aussi qui offrent une grande importance au point de vue de la fabrication ou qui ont un intérêt marqué quand il s'agit de la réception.

ESSAIS DES CIMENTS

§ 1er. **Finesse de mouture.** — *a*) L'échantillon est fractionné en quatre lots, à l'aide des trois tamis à mailles carrées définis ci-après :

1° Tamis de 324 mailles par centimètre carré, soit, par centimètre linéaire, 18 fils de $0^{mm},20$ de diamètre ;

2° Tamis de 900 mailles par centimètre carré, soit, par centimètre linéaire, 30 fils de $0^{mm},15$ de diamètre ;

3° Tamis de 4.900 mailles par centimètre carré, soit, par centimètre linéaire, 70 fils de $0^{mm},05$ de diamètre.

b) Les essais ont lieu sur un échantillon de 100 grammes.

c) Le tamisage à la main est considéré comme terminé lorsqu'il passe moins de $0^{gr},1$ de matière sous l'action de vingt-cinq tours de bras.

d) L'emploi d'une machine à secousses est recommandé pour éliminer rapidement la plus grande partie de la fine poussière.

e) Le tamisage complet à la machine est également recommandé ; mais il ne peut faire l'objet d'une prescription, tant que les conditions auxquelles doit satisfaire la machine ne sont pas rigoureusement arrêtées.

f) On exprime les résultats, pour chaque tamis, en totalisant les résidus qui ne sont pas susceptibles d'y passer.

§ 2. **Poids spécifique.** — *a*) Pour déterminer le poids spécifique des ciments, on peut employer l'une des méthodes actuellement en usage, pourvu qu'elle permette d'obtenir la première décimale avec certitude et la deuxième avec une approximation de deux unités.

b) Les précautions à prendre dans l'exécution de l'expérience sont les suivantes :

1° On s'assure que le ciment est franchement pulvérulent ; les parties retenues par le tamis de 900 mailles par centimètre carré, ainsi que celles agglomérées par l'humidité, après qu'elles ont été réduites en poudre et passées à ce tamis, sont mélangées intimement avec le reste de l'échantillon sur la totalité duquel doit porter l'essai ;

2° Le liquide dont on se sert est la benzine ou l'essence minérale ;

3° La température doit rester constante pendant toute la durée de l'opération ; elle ne doit pas être supérieure à 15°.

§ 3. **Densité apparente.** — *a*) La densité apparente d'un ciment sera déterminée en pesant une mesure de forme cylin-

drique, ayant 1 litre de capacité et $0^m,10$ de hauteur, remplie au moyen de l'*entonnoir à tamis* (*fig.* 48).

b) Cet appareil se compose d'un entonnoir vertical, dont la section circulaire a $0^m,02$ de diamètre à la base et $0^m,15$ de diamètre à une hauteur de $0^m,15$ au-dessus de cette base, hauteur à laquelle est placée une tôle perforée ayant, par décimètre carré, 1.050 trous environ de $0^m,002$ de diamètre[1]. L'entonnoir se prolonge par un ajutage cylindrique de $0^m,02$ de diamètre et de $0^m,10$ de hauteur. L'appareil est supporté par un bâti en forme de trépied.

c) On place tout d'abord la mesure à $0^m,05$ en contre-bas de l'extrémité inférieure de l'ajutage.

On verse ensuite le ciment dans l'entonnoir, par petites masses de 300 à 400 grammes, que l'on forcera à passer par le tamis, en y promenant une spatule en bois de $0^m,04$ de largeur.

On arrête le remplissage quand la base du cône, qui s'est élevé peu à peu au-dessus de la mesure, atteint le bord supérieur. On enlève alors l'excès de ciment, en faisant glisser sur ce bord une lame bien droite, tenue dans un plan vertical.

Pendant toute l'opération, on ne fait subir à la mesure aucune trépidation ni aucun choc.

d) On adopte comme poids du litre la moyenne des résultats obtenus dans cinq opérations successives.

e) Il est utile de faire porter les essais sur le ciment tel qu'il est livré et sur la fine poussière ayant passé au tamis de 4.900 mailles. Dans tous les cas, on indique, en même temps que la densité apparente, le degré de finesse de mouture de l'échantillon sur lequel on a opéré.

§ 4. **Analyse chimique.** — *a*) Il y a lieu de laisser aux opérateurs la liberté des méthodes à employer pour déterminer la composition chimique des ciments[2].

b) Les analyses complètes sont recommandées; tous les

1. Cette tôle se trouve dans le commerce.

2. La méthode d'analyse indiquée dans le cours du présent chapitre satisfait aux exigences de la pratique.

éléments trouvés doivent être indiqués, sans groupement, au procès-verbal de l'opération.

c) A défaut d'analyse complète, le dosage des matières volatiles peut fournir des renseignements utiles.

§ 5. **Essais d'homogénéité.** — *a*) La loupe peut être utilement employée pour donner des indications sur le degré d'homogénéité des ciments.

b) Il convient de faire les observations sur la matière retenue par le tamis de 4.900 mailles en opérant successivement avec des grossissements d'environ trois diamètres, pour l'examen d'ensemble, et de huit, pour l'examen de détail.

c) Si l'examen révèle la présence de grains qu'on puisse soupçonner provenir de matières étrangères au ciment, on en vérifie la nature, soit par l'analyse chimique complète ou partielle du produit brut ou fractionné, soit par tout autre moyen qu'on juge plus propre à mettre ces matières étrangères en évidence.

§ 6. **Confection des pâtes et mortiers normaux.** — 1° *Pâte normale de ciment.* — A. *a*) Pour confectionner la *pâte normale de ciment*, on opère sur 1 kilogramme de ciment, qu'on étale sur une table de marbre en formant une couronne au centre de laquelle on verse d'un seul coup le volume d'eau nécessaire pour satisfaire aux conditions ci-après [1].

Suivant la nature des essais, cette eau peut être, soit de l'eau potable, soit de l'eau de mer.

Le mélange est gâché fortement à la truelle pendant cinq minutes, comptées à partir du moment où l'eau a été versée.

b) Avec une partie de la pâte obtenue, on emplit immédiatement une boîte métallique à fond plat (*fig.* 97), de forme tronconique ayant 0m,08 de diamètre à la base inférieure, 0m,09 à la base supérieure et 0m,04 de profondeur; on lisse la surface en faisant glisser la truelle sur le bord supérieur du moule et en évitant tout tassement et toute trépidation.

1. Ce volume doit évidemment être déterminé à l'aide de tâtonnements successifs.

c) Au centre de la masse ainsi formée, on fait descendre normalement à la surface de la pâte, avec précaution, et sans lui laisser acquérir de vitesse, une sonde cylindrique de $0^{m},010$ de diamètre et du poids de 300 grammes, en métal poli, propre et sèche, terminée par une section nette et d'équerre. L'appareil, dit *sonde de consistance*, doit être construit de manière à pouvoir indiquer exactement l'épaisseur de pâte restant entre le fond de la boîte et l'extrémité inférieure de la sonde. On ne fait jamais deux essais sur la pâte contenue dans une même boîte.

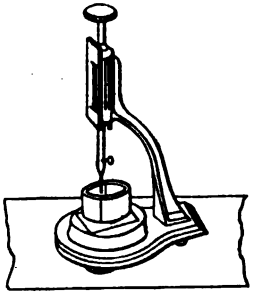

Fig. 97. — Sonde de consistance.

d) On considère comme *normale* la pâte dont la consistance est telle que l'épaisseur de la couche restant entre le fond de la boîte et l'extrémité de la sonde, au moment où celle-ci cesse de s'enfoncer sous l'action de son propre poids, est de 6 millimètres.

B. Pour les ciments à prise rapide, la quantité de ciment sur laquelle on doit opérer est réduite à 500 grammes, et la durée du gâchage à une minute.

2° *Mortiers normaux.* — A. *a*) Pour confectionner les *mortiers normaux*, on fait usage du sable naturel provenant de la plage de Leucate (Aude), convenablement tamisé, qui est dit *sable normal.*

On emploie, suivant les cas, ainsi qu'il est expliqué ci-dessous, le *sable normal simple* ou le *sable normal composé.*

b) Le *sable normal simple* est formé de grains ayant passé au tamis en tôle perforée de trous de $1^{mm},5$ de diamètre et ayant été retenus par le tamis à trous de 1 millimètre.

c) Le *sable normal composé* est formé par un mélange, par poids égaux, des sables ci-après :

N° 1, dont les grains, ayant passé au tamis de 2 millimètres, ont été retenus par le tamis de $1^{mm},5$;

N° 2, dont les grains, ayant passé au tamis de $1^{mm},5$, ont été retenus par le tamis de 1 millimètre ;

N° 3, dont les grains, ayant passé au tamis de 1 millimètre, ont été retenus par le tamis de $0^{mm},5$.

B. *a*) Il est fait usage, pour les essais autres que ceux de rupture, d'un *mortier normal plastique*, et pour les essais de rupture, d'un *mortier normal sec*.

b) Les *mortiers normaux* sont dosés, en poids, à raison de 1 partie de ciment pour 3 parties de sable, et sont gâchés, suivant la nature des essais, à l'eau potable ou à l'eau de mer.

On opère sur un kilogramme de matières (250 grammes de ciment et 750 grammes de sable) qu'on mélange intimement à sec ; on forme ensuite, sur une table de marbre, une couronne au centre de laquelle on verse, d'un seul coup, la quantité d'eau à employer, et le mélange est gâché fortement à la truelle pendant cinq minutes.

c) Pour la confection du *mortier normal sec*, on se sert du sable normal simple. La quantité d'eau employée au gâchage est de 45 grammes augmentés du sixième de celle nécessaire pour amener 1 kilogramme de ciment à l'état de pâte normale de ciment.

d) Pour la confection du *mortier normal plastique*, on se sert du sable normal composé. La quantité d'eau employée au gâchage est telle que le mortier obtenu ait une consistance plastique.

Pour s'assurer que cette consistance est bien réalisée, on emplit, avec une partie du mortier obtenu, la boîte métallique destinée aux essais de consistance (Voir ci-dessus, § 6, 1°, A, *b*) et on dérase et lisse la surface à la truelle ; la consistance est considérée comme satisfaisante si, après le lissage, le mortier ressue légèrement sous l'effet de quelques coups de truelle frappés sur les côtés de la boîte.

C. Pour les ciments à prise rapide, la quantité de matières sur laquelle on doit opérer est réduite à 500 grammes et la durée du gâchage à une minute.

D. On recommande, pour les essais des mortiers autres que les essais normaux, d'employer, de préférence à tous autres, les dosages en poids de 1 partie de ciment pour 2 de sable normal (mortiers riches) et 1 partie de ciment pour 5 de

sable normal (mortiers maigres)[1]. Le premier de ces dosages est particulièrement utile pour les ciments à prise rapide, en vue de compléter les renseignements fournis par le mortier normal dosé 1 : 3.

§ 7. **Essais de prise**[2]. — 1° *Pâtes de ciment.* — A. *a*) Les essais de prise des pâtes de ciment comportent la détermination du *début* et de la *fin de la prise*.

b) Au moment du gâchage, les températures du ciment, de l'eau et de l'air doivent être comprises entre 15 et 18° C.

Immédiatement après sa confection, la pâte est, avec les précautions indiquées précédemment au paragraphe 6 (1°, A), introduite et dérasée dans une boîte semblable à celle décrite au même paragraphe (1°, A, *b*).

Aussitôt remplie, la boîte est immergée dans un bac contenant de l'eau dont la température est maintenue entre 15 et 18°. La boîte n'est extraite du bac que pendant le temps nécessaire pour chaque constatation.

c) On emploie pour les essais une aiguille en métal, dite *aiguille Vicat*, cylindrique, lisse, propre, sèche, terminée par une section nette et d'équerre de 1 millimètre carré (diamètre $1^{mm},13$), et pesant 300 grammes.

On appelle *début de la prise* l'instant où cette aiguille, descendue normalement à la surface de la pâte, avec précaution et sans qu'on lui laisse acquérir de vitesse, ne peut plus pénétrer jusqu'au fond de la boîte.

On appellera *fin de la prise* l'instant à partir duquel la surface de la pâte pourra supporter la même aiguille, sans qu'elle y pénètre d'une quantité appréciable.

1. P étant le poids d'eau nécessaire pour amener 1 kilogramme de ciment à l'état de pâte normale, les poids d'eau à employer paraissent devoir être de 45 gr. $+ \frac{2}{9}$ P, dans le cas du mortier sec dosé à 1 : 2, et de 45 gr. $+ \frac{1}{9}$ P, dans le cas du mortier sec dosé à 1 : 5, le sable employé étant toujours le sable normal simple.

2. Il est rappelé ici que, pour chacun des essais portant sur les pâtes et mortiers, les conclusions relatives à l'essai *normal* (destiné à caractériser les produits) sont indiquées à la suite de celles relatives à l'essai *général* correspondant.

Les durées correspondantes sont comptées à partir du moment où l'eau de gâchage a été mise au contact du ciment.

d) Dans le cas où l'on veut déterminer la prise dans l'air, on opère comme il vient d'être indiqué, à cette différence près que la boîte, aussitôt remplie, est maintenue dans l'air à une température comprise entre 15 et 18°; on aura soin de vider, au fur et à mesure, l'eau qui peut remonter à la surface de la pâte et s'en séparer.

B. L'*essai normal* de prise porte sur la pâte normale de ciment immergée ainsi qu'il est dit ci-dessus (A, *b*).

2° *Mortiers.* — A. *a*) Les essais de prise des mortiers de ciment comportent la détermination de la *fin de la prise*.

b) Au moment du gâchage, les températures du ciment, du sable, de l'eau et de l'air ambiant doivent être comprises entre 15 et 18°.

Immédiatement après sa confection, le mortier est introduit, dérasé et lissé dans la boîte servant aux essais de consistance (§ 6, 1°, A; *b*).

Aussitôt remplie, la boîte est immergée dans un bac contenant de l'eau dont la température est maintenue entre 15 et 18°. La boîte n'est extraite du bac que pendant le temps nécessaire pour chaque constatation.

c) Dans le cas où l'on veut déterminer la prise dans l'air, on opère comme il vient d'être indiqué, à cette différence près que la boîte, aussitôt remplie, est maintenue dans l'air à une température comprise entre 15 et 18°.

d) La *fin de la prise* est déterminée par le moment où la surface du mortier peut supporter, sans déformation, la pression du pouce.

La durée de la prise est comptée à partir du moment où l'eau de gâchage a été mise au contact du mélange de sable et de ciment.

B. *a*) L'*essai normal* de prise porte sur le mortier normal plastique, immergé comme il est dit ci-dessus (A, *b*).

b) La *fin de la prise* est déterminée par le moment à partir duquel la sonde de consistance (§ 6, 1°, A, *c*), chargée de 5 kilogrammes, descendue avec précaution, et sans qu'on lui laisse acquérir de vitesse, normalement à la surface

du mortier, n'y pénètre plus d'une quantité appréciable.

Les dispositions qui précèdent s'appliquent aux ciments à prise rapide comme aux ciments à prise lente. Pour les premiers au moins, l'emploi du thermomètre peut fournir d'utiles indications.

§ 8. **Essais de rupture par traction.** — A. *a*) Pour les essais de rupture par traction, on fait usage d'éprouvettes en forme de 8, dites *briquettes normales*, ayant une section au milieu de 5 centimètres carrés, du type défini par le croquis (*fig.* 98).

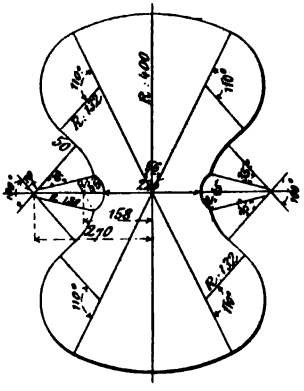

Fig. 98. — Briquette en 8.

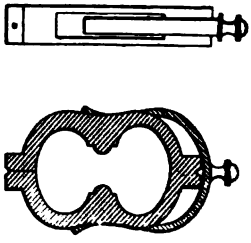

Fig. 99. — Moule à briquettes.

b) Les moules, présentant en creux la forme des briquettes (*fig.* 99), sont placés sur une plaque de marbre ou de métal poli, après avoir été, ainsi que la plaque, bien nettoyés et frottés d'un linge gras.

On remplit d'une même gâchée six moules à la fois, s'il s'agit de ciment à prise lente, et quatre, s'il s'agit de ciment à prise rapide, en mettant du premier coup, dans chaque moule, assez de matière pour qu'elle déborde. On tasse avec le doigt pour ne laisser aucun vide, et on frappe quelques coups de truelle sur les côtés du moule pour compléter le tassement et faciliter le dégagement des bulles d'air. Puis, on dérase en faisant glisser une lame de couteau

bien droite, presque horizontalement, sur les bords du moule, de manière à enlever tout l'excédent, sans exercer aucune compression. On procède enfin au lissage de la surface, en y promenant le couteau, appuyé toujours sur les bords.

Si l'on opère sur de la pâte de ciment, on attend, pour déraser, qu'elle ait pris une consistance suffisante.

c) On procède au démoulage en faisant glisser les moules sur la plaque, en les desserrant et en les éloignant des briquettes, sans les soulever, au bout de vingt-quatre heures comptées à partir du commencement du gâchage, et avant, s'il est nécessaire, au cas où la prise serait certainement terminée.

Dans tous les cas, pendant ce délai de vingt-quatre heures, les briquettes sont conservées sur leur plaque, dans une atmosphère saturée d'humidité, à l'abri des courants d'air et des rayons directs du soleil, à une température comprise, autant que possible, entre 15 et 18°. Le délai de vingt-quatre heures est réduit à une heure pour les pâtes de ciment à prise rapide, et à trois heures pour les mortiers du même ciment.

d) Il est recommandé de peser les briquettes après le démoulage, si l'on veut s'assurer de la régularité de leur confection.

e) A l'expiration des délais fixés ci-dessus au paragraphe *c*, on expose les briquettes dans le milieu choisi pour leur conservation.

Si les briquettes sont immergées dans l'eau douce, la profondeur de l'eau dans le bac ne dépasse pas 1 mètre, et cette eau est renouvelée toutes les semaines.

Si elles sont immergées dans l'eau de mer, le renouvellement a lieu tous les deux jours pendant la première semaine, et ensuite toutes les semaines. Pendant la première semaine, le volume occupé par l'eau dans le bac devra être égal à 4 fois, au moins, celui des briquettes.

On spécifie, dans tous les cas, la nature de l'eau de conservation.

Si les briquettes sont conservées à l'air, l'état hygrométrique est tenu aussi voisin que possible de la saturation, et

elles sont placées à l'abri des courants d'air et des rayons directs du soleil.

La température du milieu (eau ou air) est maintenue, autant que possible, entre 15 et 18°.

f) L'appareil de rupture (*fig.* 100) est disposé de telle sorte

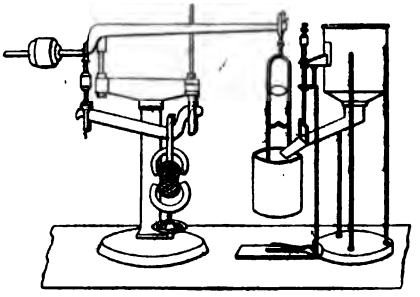

Fig. 100. — Appareil Michaëlis.

que l'effort de traction exercé sur une briquette puisse être continu et croître à raison de 5 kilogrammes par seconde. La forme et le mode d'attache des griffes doivent être conformes au croquis (*fig.* 101) qui reproduit les dispositions actuellement en usage.

g) Les ruptures sont faites au bout de sept jours, vingt-huit jours, trois mois, six mois, un an, deux ans... à compter du gâchage.

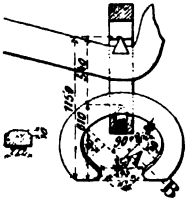

Fig. 101. — Mode d'attache des griffes.

Elles sont faites, en outre, au bout de vingt-quatre heures pour les mortiers de ciment à prise rapide, et au bout de trois et vingt-quatre heures pour les pâtes de ciment de cette nature.

h) Les briquettes provenant d'une même gâchée sont, autant que possible, réparties entre les diverses séries de six qui sont rompues aux périodes des essais fixées au paragraphe précédent.

Les résultats obtenus dans chaque essai sont produits

pour chacune des six briquettes; on formule leur moyenne et on signale les anomalies, le cas échéant.

On exprime les résultats en disant que « la résistance à la traction mesurée en opérant sur des briquettes normales en 8, de 5 centimètres carrés de section, est de tant de kilogrammes par centimètre carré ».

B. *a*) Les *essais normaux* de rupture par traction portent sur la pâte normale de ciment et sur le mortier normal sec, conservés dans l'eau douce.

On se conforme, pour ces essais, aux dispositions générales ci-dessus (A) et aux dispositions spéciales ci-après, en ce qui concerne la confection des briquettes :

b) Au moment du mélange, le ciment, le sable, l'eau et l'air sont à des températures comprises entre 15° et 18°.

Le mortier normal sec est damé dans le moule avec une spatule en fer longue de $0^m,35$ environ, manche compris, présentant une surface de battage de 25 centimètres carrés et pesant 250 grammes. On procède d'abord par petits coups répétés sur le pourtour de la briquette, puis au centre; on frappe ensuite plus énergiquement, en suivant toujours le même chemin, et en continuant le damage jusqu'à ce que la masse commence à prendre un peu d'élasticité et que l'eau sue à la surface. On procède ensuite au dérasement et au lissage comme il a été expliqué plus haut (A, *b*).

§ 9. — **Essais de rupture par compression.** — A. *a*) Pour les essais de rupture par compression, on prend comme éprouvettes les demi-briquettes séparées par la traction. Chaque demi-briquette est écrasée isolément, mais on totalise les résultats fournis par les deux demi-briquettes jumelles.

A défaut de demi-briquettes, on peut se servir d'éprouvettes cylindriques de 45 millimètres de diamètre et de 22 millimètres de hauteur, confectionnées et conservées comme les briquettes destinées aux essais de rupture par traction (§ 8, A).

b) Les éprouvettes qui présentent des rugosités ou des soulèvements apparents sont aplanies par un léger frottement à la main sur une table de grès.

c) L'appareil de rupture est disposé de telle sorte que l'effort de compression puisse croître d'une manière continue, et amener l'écrasement d'une demi-briquette au bout d'une à deux minutes.

d) Les essais sont faits aux époques fixées pour ceux de rupture par traction, et portent comme eux sur une série de six briquettes.

e) Les résultats sont produits pour chacune des six éprouvettes doubles (deux demi-briquettes jumelles) soumises aux essais; en même temps, on formule leur moyenne et on signale les anomalies.

On exprime les résultats en disant que « la résistance à l'écrasement mesurée en opérant sur des demi-briquettes normales en 8 est de tant de kilogrammes par centimètre carré [1] ».

B. Les *essais normaux* de rupture par compression portent sur les briquettes de pâte normale de ciment et de mortier normal sec qui ont servi aux essais normaux de rupture par traction. A défaut de demi-briquettes, on peut employer des éprouvettes cylindriques de 45 millimètres de diamètre et de 22 millimètres de hauteur, confectionnées et conservées dans des conditions indiquées pour ces essais (§ 8, B).

C. Pour les essais ayant pour objet la comparaison de mortiers à d'autres matériaux, on recommande provisoirement l'emploi du cube de 50 centimètres carrés de face, placé en délit [2]. On se conforme, d'une manière générale, pour ces essais, aux règles adoptées pour les autres matériaux.

§ 10. **Essais de rupture par flexion.** — A. *a*) Pour les essais de rupture par flexion, on emploie des éprouvettes en forme de prismes de $0^m,12$ de longueur, à section carrée de $0^m,02$ de côté.

1. La surface d'une briquette (par laquelle il faut diviser la charge totale de rupture) est de $31^{cm2},3$.

2. C'est-à-dire de manière que l'effort s'exerce normalement à l'une des faces qui ont été au contact des parois latérales du moule.

b) Les dispositions précédemment indiquées pour les essais à la traction, quant à la confection, au démoulage, à la pesée et à la conservation des éprouvettes, ainsi qu'aux périodes des essais, sont applicables aux essais à la flexion.

c) L'éprouvette à rompre repose, par une de ses faces latérales qui ont été au contact du moule, sur deux couteaux distants de $0^m,10$; la charge est appliquée au milieu, à l'aide d'un couteau ayant un tranchant légèrement arrondi.

L'appareil de rupture est disposé de manière que l'effort exercé sur l'éprouvette puisse croître d'une manière continue à raison de 1 kilogramme par seconde.

d) Les résultats sont, comme pour les essais de rupture par traction et par compression, produits pour chacune des six éprouvettes soumises aux essais; en même temps, on formule leur moyenne et on signale les anomalies constatées. On exprime les résultats en disant que « la charge de rupture par flexion est de tant de kilogrammes pour une éprouvette prismatique à section carrée de $0^m,02$ de côté, posée sur deux appuis distants de $0^m,10$ ».

B. Les *essais normaux* de rupture par flexion portent sur des pâtes et mortiers confectionnés et conservés ainsi qu'il a été indiqué pour les essais normaux à la traction (§ 8, B).

§ 11. **Essais de déformation.** — A. Les essais destinés à reconnaître les déformations déterminées par la présence des expansifs sont effectués sur les pâtes de ciment, soit à froid, soit à chaud.

B. *Essais à froid.* — *a*) Pour ces essais, on étale la pâte sur une plaque de verre de manière à former une galette d'environ $0^m,10$ de diamètre et de $0^m,02$ d'épaisseur, amincie sur les bords.

Immédiatement après leur confection, les galettes destinées aux essais dans l'eau sont immergées dans les mêmes conditions que les éprouvettes servant aux essais de rupture (§ 8, A, *e*).

Les galettes destinées aux essais à l'air y sont également exposées dans les conditions indiquées pour ces éprouvettes (*Ibid.*).

On note l'état des galettes au bout des périodes de temps admises pour les essais de rupture (sept jours, vingt-huit jours, trois mois, six mois, un an, deux ans, etc.).

b) Si l'on veut mesurer les gonflements que subissent les pâtes de ciment par l'effet d'une immersion prolongée dans l'eau froide, on peut employer des baguettes de $0^m,80$ de longueur, à section carrée de $0^m,012$ de côté, que l'on place verticalement dans un tube de verre de $0^m,025$ de diamètre rempli d'eau.

L'allongement est accusé par le déplacement sur un cadran d'une aiguille actionnée par une tige que l'on a scellée à l'extrémité supérieure de la baguette.

C. *Essais à chaud.* — *a*) On emploie pour ces essais des éprouvettes cylindriques de $0^m,030$ de diamètre et de $0^m,030$ de hauteur, confectionnées dans des moules en métal d'une épaisseur de $0^{mm},5$ (*fig.* 102). Ils sont fendus suivant une génératrice et portent, soudées de chaque côté de la fente, deux aiguilles de $0^m,15$ de longueur; l'augmentation de l'écartement des extrémités de ces deux aiguilles donnera une mesure du gonflement.

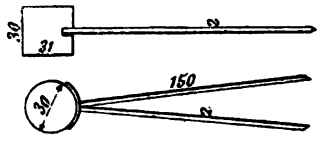

Fig. 102. — Moule à aiguilles (Le Chatelier).

b) Les moules, aussitôt remplis, sont immergés dans l'eau froide. Une fois la prise terminée, et dans un délai qui n'excède pas vingt-quatre heures au delà de cette prise, la température de l'eau est élevée progressivement à 100°, en un temps qui doit être compris entre un quart d'heure et une demi-heure.

La température de 100° est maintenue pendant six heures consécutives et on laisse ensuite refroidir pour faire les mesures finales.

c) Nota. — Cette méthode d'essai à chaud n'est pas applicable aux ciments à prise rapide.

D. Les *essais normaux* de déformation portent sur la pâte normale de ciment.

§ 12. **Essais de rendement.** — A. *a*) Le rendement en pâte d'un ciment est le volume de pâte obtenu par le gâchage, à consistance normale, de 1 kilogramme de ciment.

Le rendement en mortier d'un ciment est le volume de mortier obtenu par le gâchage, à consistance plastique, de 1 kilogramme de sable et de ciment mélangés dans la proportion correspondant à ce mortier.

b) On détermine le rendement en constatant le volume occupé dans une éprouvette cylindrique en verre, graduée, de $0^{m},06$ environ de diamètre, par la pâte ou le mortier qu'on y introduit aussitôt après le gâchage, avec les précautions nécessaires pour éviter autant que possible l'emprisonnement de bulles d'air.

c) On peut, s'il y a lieu, déterminer le rendement avec plus de précision, en moulant la pâte ou le mortier suivant un bloc de forme quelconque, et en constatant, après durcissement, la différence de poids dans l'air et dans l'eau de ce bloc préalablement enduit de suif.

B. L'*essai normal* de rendement porte sur la pâte normale de ciment et sur le mortier normal plastique.

§ 13. **Essais de porosité.** — A. La porosité d'une pâte ou d'un mortier a pour mesure le rapport du volume des vides que présente cette pâte ou ce mortier au volume apparent total, le vide comprenant le volume occupé par l'eau d'imbibition et par l'eau hygrométrique, à l'exclusion de l'eau de combinaison, qui fait évidemment partie du plein.

Si l'on appelle V le volume apparent total, v le volume du plein, la porosité est donnée par la formule :

$$\text{Porosité} = \frac{V - v}{V}.$$

B. *a*) Pour déterminer la porosité, on opère sur des éprouvettes ayant, autant que possible, un volume apparent compris entre $0^{lit},30$ et $0^{lit},50$.

b) Le volume plein (v) s'obtient en prenant la différence ($P - p$) du poids de l'éprouvette sèche pesée dans l'air (P) et du poids de l'éprouvette imbibée d'eau pesée dans l'eau (p).

Pour réaliser l'imbibition complète, on maintient l'éprouvette pendant un quart d'heure dans l'air raréfié à une pression ne dépassant pas 25 millimètres de mercure et on fait arriver de l'eau sur l'éprouvette jusqu'à son immersion complète, en conservant le même degré de vide. Une fois l'éprouvette recouverte d'eau, on laisse la pression atmosphérique se rétablir et on attend vingt-quatre heures avant de faire la pesée qui doit donner p.

A défaut de moyen convenable pour raréfier l'air, on produit l'imbibition par l'action de l'eau bouillante, quand les mortiers pourront supporter cette action sans inconvénient. A cet effet, on laisse l'éprouvette le pied dans l'eau pendant quarante-huit heures; au bout de ce temps, on l'immerge complètement dans l'eau froide qui est portée à l'ébullition et maintenue ensuite au même état pendant deux heures. Puis, on laisse refroidir sans sortir l'éprouvette et on fait, au bout de vingt-quatre heures, la pesée qui doit donner p.

Pour obtenir la dessiccation de l'éprouvette, on la maintient, jusqu'à ce qu'elle ne perde plus de poids, dans une étuve chauffée entre 40 et 50°. Le poids final mesuré sera P. Pour cette opération, on évite avec soin la pénétration dans l'étuve de l'acide carbonique provenant des produits de la combustion de l'appareil de chauffage.

Pour certains produits, la dessiccation effectuée dans ces conditions peut ne pas faire disparaître toute l'eau hygrométrique ou, au contraire, enlever un peu d'eau combinée, ce qui laisse subsister une légère incertitude sur les valeurs trouvées pour la porosité.

c) Le volume apparent de l'éprouvette (V) peut s'obtenir par des mesures directes, si elle présente une forme géométrique. Dans le cas contraire, on mesure ce volume en prenant la différence entre les poids de l'éprouvette pesée dans l'eau et dans l'air, son état d'imbibition étant resté le même. Pour assurer la constance de cet état d'imbibition, on enduit l'éprouvette d'une mince couche de suif fondu, qui est posée au pinceau et étendue avec le doigt. On a soin de faire la pesée dans l'eau avant la pesée dans l'air.

C. *a*) L'*essai normal* de porosité porte sur le mortier normal plastique âgé de vingt-huit jours, conservé dans l'eau.

b) Pour les essais qui seraient faits sur des mortiers d'âge et de composition différents, on recommande d'employer de préférence des mortiers plastiques dosés à 1 : 2 et à 1 : 5, âgés de sept jours, vingt-huit jours, trois mois, six mois, un an.....

c) Dans tous les cas, on indique la composition, l'âge et le mode de conservation du mortier soumis aux essais.

§ 14. **Essais de perméabilité.** — A. *a*) La perméabilité des pâtes et mortiers est exprimée par le nombre de litres d'eau écoulés à l'heure à travers un bloc cubique de 50 centimètres carrés de face, dans les conditions ci-après :

b) L'eau destinée aux filtrations est amenée par un tube de verre de $0^m,035$ de diamètre et de $0^m,11$ de hauteur (*fig.* 103), scellé verticalement à l'aide de ciment pur, sur la face supérieure du bloc posé en délit, préalablement repiquée, pour mettre le mortier bien à vif. Le tube, fermé à sa partie supérieure par un bouchon en caoutchouc, est mis en communication avec un réservoir élevé au niveau correspondant à la charge d'eau. On adopte pour cette charge, suivant la perméabilité des mortiers, des hauteurs de $0^m,10$, 1 mètre ou 10 mètres [1].

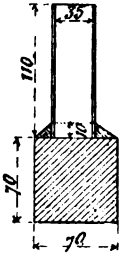

Fig. 103. — Essai de perméabilité.

c) Avant d'être mis en expérience, le bloc sera immergé dans un bac pendant quarante-huit heures, avec les précautions nécessaires pour arriver à une imbibition aussi complète que possible.

Une fois mis en expérience, le bloc est maintenu immergé sur toute sa hauteur.

d) Le volume écoulé à l'heure est constaté après vingt-quatre heures, sept jours, vingt-huit jours, trois mois [2]...

e) Les constatations portent sur trois blocs semblables; on donne les résultats moyens correspondants seulement aux deux blocs les plus concordants.

1. Au cas où l'on est conduit à adopter des hauteurs différentes, on choisit de préférence des multiples de $0^m,50$.

2. Au début de l'essai, on multiplie les constatations s'il y a lieu.

En même temps qu'on exprime la perméabilité aux diverses époques (vingt-quatre heures, sept jours, vingt-huit jours, trois mois, etc.), on a soin de faire connaître les charges (0m,10, 1 mètre ou 10 mètres) sous lesquelles on a opéré.

B. *a*) L'*essai normal* de perméabilité porte sur le mortier normal plastique âgé de vingt-huit jours, conservé dans l'eau.

b) Pour les essais qui seraient faits sur des mortiers d'âge et de composition différents, on recommande d'employer de préférence des mortiers plastiques dosés à 1 : 2 et à 1 : 5, âgés de sept jours, vingt-huit jours, trois mois, etc...

c) Dans tous les cas, on indique la composition, l'âge et le mode de conservation du mortier soumis aux essais.

§ 15. **Essais de décomposition par l'eau de mer.** — A. *a*) Les essais sont faits par immersion et par filtrations.

b) On emploie, pour l'immersion, des briquettes normales en 8, maintenues, vingt-quatre heures après leur confection, dans un bac contenant de l'eau de mer qui est renouvelée tous les deux jours pendant la première semaine et ensuite toutes les semaines. Pendant la première semaine, le volume de l'eau doit être égal à quatre fois, au moins, celui des briquettes.

c) On emploie, pour les filtrations, des éprouvettes en forme de blocs cubiques, semblables à celles destinées aux essais de perméabilité et disposées ainsi qu'il a été indiqué pour ces essais (§ 14, A). La charge est de 0m,10, 1 mètre ou 10 mètres, suivant la perméabilité des éprouvettes soumises aux essais. On opère sur deux séries d'éprouvettes ; celles de la première série sont maintenues à l'air, et celles de la deuxième sont maintenues immergées, de toute leur hauteur, dans de l'eau de mer.

d) A défaut d'eau de mer naturelle, on pourra se servir d'une eau de mer artificielle ayant la composition suivante[1] :

1. A la notation par équivalents a été substituée la notation atomique.

	Grammes
Chlorure de sodium (NaCl).....	30
Sulfate de magnésium cristallisé ($MgSO^4,7H^2O$)..	5
Chlorure de magnésium cristallisé ($MgCl^2,6H^2O$)..	6
Sulfate de calcium hydraté ($CaSO^4,2H^2O$).....	1,5
Bicarbonate de potassium (CO^3,KH).....	0,2
Eau distillée, de pluie ou de rivière, bouillie....	1.000

e) Des séries de briquettes normales en 8 et de blocs cubiques sont conservées dans l'eau douce pour servir de témoins.

f) On exprime les résultats des essais en donnant les indications suivantes, comparativement pour les éprouvettes et leurs témoins :

1° Modification de l'aspect des éprouvettes ;

2° Résistance à la traction et à la compression pour les briquettes immergées et à la compression pour les blocs soumis aux filtrations ;

3° Composition chimique.

Les essais sont faits, suivant les cas, à l'une ou plusieurs des époques fixées pour les résistances à la rupture (vingt-huit jours, trois mois, six mois, un an.....)

B. *a*) L'*essai normal* de décomposition par l'eau de mer porte sur le mortier normal plastique ; pour les essais par filtration, on opère sur des éprouvettes âgées de vingt-huit jours, conservées dans l'eau de mer.

b) Pour les essais qui sont faits sur des mortiers d'âge et de compositions différents, on recommande d'employer, de préférence, des mortiers dosés à 1 : 2 et à 1 : 3, âgés de sept jours, vingt-huit jours, trois mois, etc.

c) Dans tous les cas, on indique la composition, l'âge et le mode de conservation du mortier soumis aux essais.

§ 16. **Essais d'adhérence.** — A. Pour comparer la force d'adhérence des ciments, on soumet à des essais de rupture par traction des éprouvettes en forme de double T, confectionnées à l'aide du moule spécial dont le dessin est donné figure 104, chacune des deux matières dont on étudie

l'adhérence devant constituer l'une des moitiés de chaque éprouvette.

On se conforme pour ces essais aux dispositions ci-après :

B. *Essai normal destiné à comparer la force d'adhérence de divers ciments à une même matière.* — *a*) On préparera des *blocs normaux d'adhérence* en mortier composé, en poids, de 1 partie de ciment Portland passé au tamis de 900 mailles et de 2 parties de sable normal n° 3 (§ 6, 2°, A, *c*).

Le mortier est gâché avec 9 0/0 d'eau et comprimé très

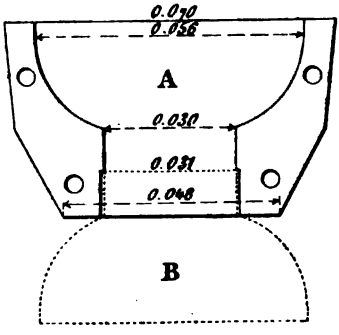

Fig. 104. — Moule pour essais d'adhérence.

fortement dans le moule, dont le fond a été préalablement garni par une plaque métallique mobile. Les blocs d'adhérence sont immergés dans l'eau douce au bout de vingt-quatre heures ; ils y sont conservés jusqu'au moment de l'emploi, et au moins pendant vingt-huit jours. Quand on veut les utiliser, on les fait sécher, puis on passe la surface d'adhérence au papier d'émeri.

b) On emploie, pour les essais, le mortier plastique normal, qui est introduit, par un simple tassement à la truelle, dans le moule disposé de manière que le bloc normal d'adhérence en forme le fond. Le démoulage de l'éprouvette constituée par le bloc normal soudé au mortier à essayer (*fig.* 105) se fait une fois la prise complètement terminée.

c) On se conformera, quant au nombre et à la conservation

des éprouvettes, aux périodes des essais, au mode de rupture et à l'expression des résultats, aux prescriptions concernant les essais de résistance à la traction.

C. *Essais destinés à comparer la force d'adhérence d'un ciment à diverses matières.* — *a*) On adopte, pour ces essais, les dispositions ci-dessus, à cette différence près que les blocs normaux d'adhérence sont remplacés par des blocs confectionnés avec les diverses matières à essayer.

Si la matière peut être moulée, le bloc d'adhérence est confectionné à l'aide du moule, comme *un bloc normal.*

Si la matière est solide, on prépare une plaquette de quelques millimètres d'épaisseur, ayant une face bien dressée, que l'on place au fond du moule, et on complète le bloc en le remplissant avec du ciment pur.

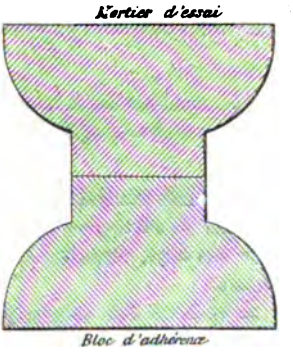

FIG. 105. — Bloc normal d'adhérence.

b) Dans le cas où l'on ne fait pas usage du mortier normal plastique, on indique la composition du mortier employé.

ESSAIS DES CHAUX [1]

1° CHAUX HYDRAULIQUES

§ 1er. **Finesse de blutage.** — Mêmes conclusions que pour la détermination de la finesse de mouture des ciments (§ 1er), sauf en ce qui concerne le tamis le plus fin (4.900 mailles), qui sera remplacé par un tamis de 2.025 mailles, ainsi défini :

Nombre de mailles par centimètre carré.....	2.025
Nombre de fils par centimètre linéaire.....	45
Grosseur des fils.....	$0^{mm},10$

1. Les circulaires ministérielles des 2 juin 1902 et 20 novembre 1904 ont apporté des modifications en ce qui concerne les essais de chaux hydrauliques (Voir p. 286 et suiv.).

§ 2. **Poids spécifique.** — Comme pour les ciments (§ 2).

§ 3. **Densité apparente.** — Comme pour les ciments (§ 3). Les essais doivent porter sur la chaux hydraulique en **poudre,** telle qu'elle est livrée, et sur la fine poussière ayant passé au tamis de **2.025 mailles.**

§ 4. **Analyse chimique. Essais d'homogénéité.** — Comme pour les ciments (§ 4 et 5).

§ 5. **Confection des pâtes et mortiers normaux.** — 1° *Pâte normale de chaux.* — Comme pour les ciments (§ 6, 1°, A).

2° *Mortiers normaux.* — A. Comme pour les ciments (§ 6, 2°, A).

B. *a*) Il est fait usage, pour les essais autres que ceux de rupture, de *deux mortiers normaux plastiques*, et pour les essais de rupture, de *deux mortiers normaux secs.*

b) Les *mortiers normaux* sont dosés en poids, l'un à raison de 1 partie de chaux pour 3 de sable (250 grammes de chaux pour 750 grammes de sable), l'autre à raison de 1 partie de chaux pour 5 de sable (167 grammes de chaux pour 833 grammes de sable), et gâchés à la truelle pendant cinq minutes en opérant sur 1 kilogramme de matière, comme les mortiers de ciment (§ 6, 2°, B, *b*).

c) Les *mortiers normaux secs* sont confectionnés avec du sable normal simple.

La quantité d'eau employée au gâchage est de 45 grammes augmentés du sixième de celle nécessaire pour amener 1 kilogramme de chaux à l'état de pâte normale, dans le cas du dosage 1 : 3, et augmentés du neuvième de cette quantité, dans le cas du dosage 1 : 5.

d) Les *mortiers normaux plastiques* sont confectionnés suivant les règles indiquées pour les mortiers de ciment (§ 6, 2°, B, *d*), avec du sable normal composé.

C. On recommande, pour les essais autres que les essais normaux, d'employer, de préférence à tous autres, le dosage en poids de 1 partie de chaux pour 4 de sable normal.

§ 6. **Essais de prise.** — Comme pour les ciments (§ 7).

§ 7. **Essais de rupture** (*traction*, *compression*, *flexion*). — Comme pour les ciments (§ 8, 9 et 10), sauf les modifications ci-après :

a) Les éprouvettes sont démoulées, autant que possible, au bout de vingt-quatre heures, et exposées dans le milieu choisi pour leur conservation, après avoir été maintenues à l'air pendant un délai de deux, quatre ou sept jours comptés à partir du moment de la confection.

Dans tous les cas, il est fait mention de ce délai en même temps qu'on indique les résultats des essais.

b) Les *essais normaux* de rupture portent sur les mortiers normaux secs dosés à 1 : 3 et à 1 : 5, conservés dans l'eau douce ; il n'est pas fait d'*essais normaux* sur la pâte de chaux.

§ 8. **Essais de déformation.** — Comme pour les ciments (§ 11), sauf en ce qui concerne les essais à chaud, pour lesquels la température de l'eau (C,*b*) doit être réduite de 100 à 50°.

§ 9. **Essais de rendement, de porosité et de perméabilité.** — Comme pour les ciments (§ 12, 13 et 14). Les mortiers sur lesquels portent les *essais normaux* sont les mortiers normaux plastiques dosés à 1 : 3 et à 1 : 5.

§ 10. **Essais de décomposition par l'eau de mer.** — Comme pour les ciments (§ 15), sauf en ce qui concerne l'immersion des briquettes, (A, *b*) pour laquelle le délai après la confection est porté de vingt-quatre heures à deux, quatre ou sept jours, comme pour les essais de rupture.

Les *essais normaux* portent sur les mortiers normaux plastiques dosés à 1 : 3 et à 1 : 5.

§ 11. **Essais d'adhérence.** — Comme pour les ciments (§ 16).

Les *essais normaux* portent sur les mortiers normaux plastiques dosés à 1 : 3 et à 1 : 5.

2° CHAUX GRASSES

A. Les essais des chaux grasses ayant pour objet d'apprécier leur degré de pureté comportent, soit l'*analyse chimique*, soit, dans le cas où l'on n'a pas besoin d'une grande précision, la *lévigation*.

a) Les conclusions relatives à l'*analyse chimique* des ciments sont applicables à l'analyse des chaux grasses (§ 4).

b) Pour les essais de *lévigation*, on réduit en pâte un poids déterminé de chaux en pierre, et on soumet cette pâte à l'action d'un courant d'eau, en prenant les précautions nécessaires pour que les matières étrangères ne puissent s'échapper. Le rapport du poids de ces matières au poids total soumis à l'essai donne la mesure du degré de pureté de la chaux.

B. Le *rendement* des chaux grasses est déterminé en opérant sur 1 kilogramme de chaux en pierre, suivant la méthode indiquée pour le rendement en pâte des ciments (§ 12, A). Pour cet essai, la chaux en pierre est tout d'abord éteinte par immersion, puis gâchée à la consistance plastique normale (§ 6, 1°, A).

CONSIDÉRATIONS SUR LES ESSAIS

La densité absolue et apparente, la finesse et l'homogénéité des produits hydrauliques ne sont pas toujours des indices de la bonne ou de la mauvaise qualité d'un agglomérant. Le fabricant peut être incité à relever la densité de la matière par l'addition de sulfate de baryum. Il faut alors recourir à l'analyse pour déceler cette fraude.

Le poids spécifique du ciment Portland varie de 3,10 à 3,20. Il n'est pas rare cependant de rencontrer des ciments dont le poids spécifique est 3 ou 3,05; cela tient à leur éventement dû à l'absorption de l'anhydride carbonique de l'air.

La densité apparente d'un ciment est différente suivant le mode opératoire employé. Tel ciment qui donne une densité apparente de 1 kilogramme au litre donnera un chiffre de $1^{kg},30$ si l'on emploie un hectolitre comme mesure ou

1kg,60 si on le tasse avant d'en prendre le poids. C'est pourquoi il est nécessaire de suivre très exactement les prescriptions indiquées par la Commission des méthodes d'essai.

On attache maintenant à la mouture une importance dont on se souciait peu autrefois. Les ciments ne laissent le plus souvent qu'un résidu inférieur à 25 ou 30 0/0 sur le tamis à 4.900 mailles et un résidu inférieur à 4 ou 5 0/0 sur le tamis à 900 mailles. Certaines usines conduisent même leur fabrication de manière à obtenir des produits dont le résidu n'est que de 10 à 15 0/0 sur le tamis à 4.900 mailles.

Les essais de résistance se font pour la traction et pour la compression à sept et vingt-huit jours, à trois et six mois, à un an, etc.; l'essai usuel est à vingt-huit jours. Ils portent sur le mortier de ciment pur et sur le mortier composé de 1 partie de ciment et 3 parties de sable normal en poids.

La variation dans les résistances d'un produit hydraulique d'une certaine nature avec un produit hydraulique d'une autre nature n'est pas la même et semble échapper à une loi générale.

La résistance mécanique varie avec la proportion d'eau de gâchage et la quantité de sable. Pour le ciment Portland, il n'est guère possible d'ajouter plus d'une fois son poids de sable sans diminuer la résistance. Avec la chaux hydraulique, il faut ajouter 3 fois son poids de sable pour produire le même effet. On sait d'autre part que, pour une même proportion de sable, la résistance varie avec la nature et le degré de finesse de ce sable. Les sables fins donnent de plus faibles résistances.

Tous les essais mentionnés plus haut n'intéressent pas au même titre le fabricant et le consommateur. Pour le constructeur, il est surtout utile d'avoir une fixation dans les teneurs que l'on doit admettre dans tel ou tel essai. A cet égard on trouve dans l'arrêté ministériel du 2 juin 1902, concernant les fournitures de ciments et de chaux hydrauliques dans les travaux publics, les conditions générales auxquelles doivent satisfaire ces produits. Les agents réceptionnaires et les entrepreneurs notamment ont tout intérêt à bien se pénétrer des prescriptions contenues dans cet arrêté et dans les cahiers des charges-types qui sont reproduits ci-après.

ARRÊTÉ MINISTÉRIEL

DU 2 JUIN 1902

CONCERNANT LES FOURNITURES DE CIMENTS ET DE CHAUX HYDRAULIQUES

ARTICLE PREMIER. — **Dispositions générales.** — Toutes les fournitures de ciments et de chaux relatives à l'exécution des travaux dépendant de l'Administration des travaux publics, qu'il s'agisse de marchés pour fourniture sans emploi ou de marchés de travaux comprenant la fourniture et l'emploi, sont soumises, en tout ce qui leur est applicable, aux dispositions suivantes.

TITRE PREMIER

CLAUSES APPLICABLES A TOUS LES MARCHÉS

ART. 2. — **Mode de livraison.** — Le ciment et la chaux, lorsqu'elle est fournie en poudre, sont livrés en sacs ou en barils.

Les sacs renferment un poids net de 50 kilogrammes; ils sont cousus en dedans et fermés par un scellement au plomb à la marque du fabricant et d'un modèle accepté par l'Administration.

Les barils portent sur l'un des fonds la marque de fabrique et sur l'autre l'indication du poids net de ciment ou de chaux qu'ils renferment.

Les sacs et barils doivent être en parfait état au moment de la livraison. Tout ciment ou chaux humides ou ayant été altérés par l'humidité sont rejetés.

A l'arrivée de chaque expédition, les connaissements ou lettres de voiture sont communiqués à l'Ingénieur.

ART. 3. — **Emmagasinage.** — Les sacs ou barils de ciment ou de chaux sont conservés dans des magasins très secs, clos et couverts. Ils y sont déposés par tas distincts correspondant à chaque livraison.

L'entrepreneur a la garde et la responsabilité des ciments et des chaux en magasin jusqu'au moment de l'emploi, sauf l'exception stipulée à l'article 17.

Tout sac ou baril de ciment ou de chaux qui se trouve avarié ou dont les enveloppes ne sont pas en bon état au moment de la délivrance pour emploi sera rebuté.

ART. 4. — **Épreuves.** — Aucun ciment et aucune chaux ne peuvent être employés avant d'avoir été soumis aux épreuves prescrites par le cahier des charges spécial de l'entreprise, et reçus provisoirement.

L'Ingénieur a le droit de refaire, pendant toute la durée du séjour en magasin des chaux et ciments reçus provisoirement, les épreuves prescrites par le cahier des charges spécial de l'entreprise et de rebuter les lots qui ne satisferaient plus, au moment de la délivrance pour emploi ou de la réception définitive, aux conditions exigées pour ces épreuves.

Lorsque les épreuves ont donné des résultats défavorables, l'entrepreneur peut demander qu'on les recommence au laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées.

ART. 5. — **Prélèvement des échantillons.** — Les échantillons à soumettre aux épreuves sont prélevés, en des profondeurs et des points différents, dans plusieurs sacs, barils ou tas désignés par l'ingénieur. Les ciments ou les chaux provenant de prélèvements différents ne doivent pas être mélangés.

ART. 6. — **Qualité.** — Le ciment ou la chaux sont de composition et de qualités constantes : ils ne contiennent ni incuits, ni matières étrangères.

ART. 7. — **Finesse de mouture ou de blutage.** — Les essais portent sur un échantillon de 100 grammes. Le tamisage est effectué au moyen de tamis de 324, 900 ou 4.900 mailles par centimètre carré ; les fils de ces trois tamis ont des grosseurs respectives de 20, 15 ou 5 centièmes de millimètre.

ART. 8. — **Densité apparente.** — La densité apparente est déterminée en versant doucement le ciment ou la chaux, sans les faire asser, dans une mesure métallique de forme cylindrique ayant litre de capacité et 10 centimètres de hauteur.

Le ciment ou la chaux contenus dans la mesure sont pesés. On prend pour la densité apparente la moyenne des poids constatés dans trois opérations successives.

En cas de contestation, on recourt pour le remplissage de la

mesure à l'emploi d'un entonnoir à tamis en tôle perforée de trous de 2 millimètres ; on place cet entonnoir de manière que l'extrémité de son ajutage inférieur soit à 5 centimètres au-dessus de la mesure. On verse le ciment ou la chaux en évitant tout choc et toute trépidation. Quand la mesure déborde, on enlève la matière en excès en faisant glisser sur son bord supérieur une lame tenue dans un plan vertical.

ART. 9. — **Durée de prise.** — Le ciment ou la chaux sont gâchés à l'eau potable en pâte ferme et sont disposés sous forme de gâteau de 4 centimètres d'épaisseur environ immédiatement immergé soit dans l'eau potable, soit dans l'eau de mer, suivant ce qui est prescrit par le cahier des charges spécial de l'entreprise. Le ciment ou la chaux, l'eau de gâchage et le bain d'immersion sont à la température d'au moins 15° C. quand il s'agit de déterminer un maximum de rapidité de prise et d'au plus 15° quand il s'agit d'un minimum.

On appelle début de la prise l'instant à partir duquel l'aiguille Vicat ayant une section de 1 millimètre carré et pesant 300 grammes ne peut plus traverser tout le gâteau.

On appelle fin de la prise l'instant à partir duquel la surface de la pâte peut supporter la même aiguille sans qu'elle y pénètre d'une quantité appréciable, telle qu'un dixième de millimètre.

En cas de contestation, on considère comme pâte ferme de ciment ou de chaux celle qui, gâchée à raison de cinq minutes par kilogramme, puis placée dans une boîte de 4 centimètres de profondeur, est traversée jusqu'à 6 millimètres du fond de cette boîte par une sonde de consistance de 1 centimètre de diamètre et du poids de 300 grammes.

ART. 10. — **Résistance à la traction.** — Les essais de résistance peuvent porter sur la pâte ferme de ciment ou de chaux pure et sur le mortier plastique de ciment ou de chaux gâché à l'eau potable. Ils sont faits à l'aide d'éprouvettes en forme de 8 ayant une section au milieu de 5 centimètres carrés.

Les moules servant à faire les éprouvettes sont remplis en une seule fois ; on les agite d'abord pour expulser les bulles d'air ; la pâte ou le mortier est ensuite comprimé à la truelle, mais non damé ; puis, avec le tranchant de celle-ci, on enlève l'excédent qui dépasse les bords du moule et on lisse la surface.

Chaque essai comporte la rupture de six éprouvettes. On prend pour la résistance à la traction la moyenne des quatre résultats les plus forts.

Le mortier est dosé en poids à raison de 1 partie de ciment ou de chaux pour 3 de sable desséché. Le sable est composé par parties égales de grains de trois grosseurs séparés par les quatre tamis de tôle perforée de trous de 1/2, 1, 1 1/2 et 2 millimètres de diamètre.

Les éprouvettes, après avoir été conservées dans une atmo-

phère humide et à l'abri des courants d'air et du soleil pendant un temps dont la durée est fixée par le cahier des charges spécial de l'entreprise, sont démoulées et immergées dans l'eau potable ou l'eau de mer, suivant ce qui a été prescrit par ce cahier des charges. En tout cas, l'eau est renouvelée tous les sept jours.

En cas de contestation, on considère comme pâte ferme de ciment ou de chaux pure celle qui est définie à l'article 9, et comme mortier plastique de ciment ou de chaux un mortier confectionné au moyen de sable de la plage de Leucate fourni par l'Administration et gâché avec une quantité d'eau égale, pour 1 kilogramme de matière, à 55 grammes $+$ 1/5 P [1], P étant le poids d'eau nécessaire pour transformer 1 kilogramme de ciment ou de chaux en pâte ferme.

ART. 11. — **Déformations à froid et à chaud.** — Les essais de déformation à froid sont faits avec des galettes de ciment ou de chaux gâchées avec de l'eau potable en pâte ferme. Les galettes, ayant environ 10 centimètres de diamètre et 2 centimètres d'épaisseur, sont amincies sur les bords et disposées sur des plaques de verre. Les galettes sont immergées dans les conditions que fixe le cahier des charges spécial de l'entreprise et conservées dans l'eau jusqu'à la réception définitive des ciments ou des chaux.

Aucune des galettes ne doit présenter la moindre trace de gonflement, saillie ou boursouflement. Les bords des galettes doivent rester bien appliqués au verre et ne se relever en aucun point.

Les essais de déformation à chaud se font sur des éprouvettes cylindriques d'un diamètre et d'une hauteur de 30 millimètres moulées dans un tube en laiton de 1/2 millimètre d'épaisseur, fendu suivant une génératrice et portant, soudée de chaque côté de la fente, une aiguille de 150 millimètres de longueur.

Dans les vingt-quatre heures qui suivent l'achèvement de la prise, ces éprouvettes sont immergées dans l'eau, qui est progressivement élevée à la température fixée par le cahier des charges et maintenue à cette température pendant le temps également fixé par le cahier des charges, puis refroidie jusqu'à la température initiale. L'augmentation d'écartement des pointes des aiguilles ne doit pas dépasser les chiffres indiqués au cahier des charges spécial de l'entreprise.

Aucune des galettes et éprouvettes ne doit présenter la moindre trace de gonflement ni de déformations telles que fendillements, saillies, boursouflements. Les bords des galettes doivent rester bien appliqués au verre et ne se relever en aucun point.

ART. 12. — **Constance de la température.** — L'eau dans laquelle les éprouvettes et galettes sont conservées doit être maintenue à des températures comprises entre 12 et 18° C.

1. Circulaire ministérielle du 29 novembre 1904.

ART. 13. — **Enlèvement du ciment et de la chaux rebutés.** — Le ciment ou la chaux rebutés sont enlevés des magasins par les soins et aux frais de l'entrepreneur dans un délai de dix jours à dater de la notification du procès-verbal de rebut.

Faute par l'entrepreneur de se conformer à cette prescription, il sera procédé d'office par l'Ingénieur à l'enlèvement du ciment ou de la chaux rebutés, et ce ciment ou cette chaux sont transportés et déposés, aux frais, risques et périls de l'entrepreneur, dans des magasins loués à son compte.

TITRE II

CLAUSES APPLICABLES AUX MARCHÉS POUR FOURNITURE SANS EMPLOI

ART. 14. — **Commandes.** — Le ciment ou la chaux sont fournis par lots successifs dont l'importance et les délais de livraison sont fixés par des ordres de service. Le cahier des charges spécial de l'entreprise détermine la quantité maximum de ciment ou de chaux qui peut être demandée mensuellement à l'entrepreneur, ainsi que la durée minimum du délai accordé pour l'exécution de chaque commande.

En cas de retard dans la livraison, l'Administration peut, dix jours après la notification à l'entrepreneur d'une mise en demeure de l'Ingénieur, acheter d'office et à ses frais les quantités de ciment ou de chaux qui n'ont pas été livrées.

Si le ciment ou la chaux fournis donnent lieu à un procès-verbal de rebut et que l'entrepreneur, mis en demeure, n'ait pas remplacé, dans un délai qui sera fixé par l'Ingénieur et qui est d'au moins dix jours, le ciment ou la chaux rebutés, l'Administration peut également acheter d'office et aux frais de l'entrepreneur une quantité de ciment ou de chaux égale à celle qui a été rebutée.

Dans les deux cas le montant de l'entreprise est diminué d'autant, sans que l'entrepreneur puisse invoquer le bénéfice de l'article 31 des clauses et conditions générales.

ART. 15. — **Restitution des enveloppes.** — Les sacs vides sont réintégrés en magasin à la diligence de l'Administration au fur et à mesure de l'emploi et tenus à la disposition de l'entrepreneur, qui doit les enlever à ses frais.

A défaut d'enlèvement dans le délai fixé par l'Ingénieur et en cas d'encombrement des magasins, les sacs vides sont retournés d'office à l'entrepreneur, à son adresse et à ses frais.

La valeur des sacs non rendus est payée à l'entrepreneur, en fin d'entreprise, au prix fixé par le cahier des charges de l'entreprise, sans déduction du rabais de l'adjudication.

Les barils vides restent la propriété de l'Etat.

ART. 16. — **Pesage.** — Tous les sacs ou barils sont pesés contradictoirement au moment de l'entrée en magasin.

On détermine le poids de la tare en pesant un nombre d'enveloppes égal à 10 0/0 environ du nombre total.

ART. 17. — **Réception.** — La réception provisoire de chaque lot de fourniture est prononcée dès que le ciment ou la chaux composant ce lot ont satisfait aux épreuves fixées par le cahier des charges de l'entreprise.

Le ciment ou la chaux reçus provisoirement sont portés en compte comme approvisionnements jusqu'à la délivrance pour emploi.

Le ciment ou la chaux qui n'ont pas été employés dans un délai de six mois, à dater de la réception provisoire, sont portés en travaux terminés à l'expiration du délai de six mois s'ils satisfont à toutes les conditions prescrites, et l'entrepreneur est, à partir de ce moment, déchargé de toute responsabilité pour la garde et la conservation en magasin.

ART. 18. — **Délai de garantie.** — Le délai de garantie est d'un an à dater de la réception provisoire de la dernière fourniture partielle.

CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 1

POUR LES FOURNITURES DE CIMENTS PORTLAND DESTINÉES A DES TRAVAUX EN PRISE A LA MER

ARTICLE PREMIER. — **Définition du produit.** — Le ciment Portland est produit par la mouture d'un mélange intime de carbonate de chaux, silice, alumine et fer cuit jusqu'à ramollissement.

ART. 2. — **Provenance et contrôle à l'usine.** — Le ciment provient directement et exclusivement d [1].

1. S'il s'agit d'un marché de fourniture : de l'usine du soumissionnaire.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi et si l'importance de la fourniture ou la nature du travail à exécuter exige que l'on précise l'origine du ciment : de l'une des usines ci-après...

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi sans qu'il y ait lieu de préciser l'origine du ciment : de l'usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'Ingénieur.

L'Administration se réserve le droit d'exercer son contrôle à l'usine tant sur la fabrication que sur la conservation et l'expédition du ciment qui est fourni en exécution du présent marché.

Elle peut y installer des agents spéciaux en permanence.

ART. 3. — **Mode de livraison.** — Le ciment est livré (en sacs ou en barils).

ART. 4. — **Composition chimique.** — Le ciment ne doit pas contenir plus de 1,5 0/0 d'acide sulfurique, ni plus de 2 0/0 de magnésie, ni plus de 8 0/0 d'alumine, ni des sulfures en proportions dosables.

Son indice d'hydraulicité, c'est-à-dire le rapport entre les poids de la silice combinée et de l'alumine, d'une part, et le poids de la chaux et de la magnésie, d'autre part, est au moins de 0,47 pour une teneur en alumine de 8 0/0, avec une diminution de 0,02 pour chaque 1 0/0 d'alumine en dessous de 8.

ART. 5. — **Finesse de mouture.** — Le ciment doit laisser au moins 40 0/0 de son poids sur le tamis de 4.900 mailles par centimètre carré et au plus 2 0/0 sur le tamis de 324 mailles.

ART. 6. — **Densité apparente.** — Le poids du litre de ciment est de 1.200 grammes au moins.

ART. 7. — **Durée de prise.** — Le ciment immergé dans l'eau potable ne doit pas commencer à faire prise avant un délai de vingt minutes.

La prise doit être complètement terminée dans un délai qui n'est pas inférieur à trois heures ni supérieur à douze heures.

ART. 8. — **Résistance à la traction du ciment pur.** — Les éprouvettes de ciment pur, immergées dans l'eau de mer au bout de vingt-quatre heures, doivent présenter une résistance à la traction par centimètre carré qui est au moins de :

15 kilogrammes au bout de 7 jours
30 — — 28 jours [1]

La résistance doit augmenter d'ailleurs au moins de 3 kilogrammes du septième au vingt-huitième jour.

ART. 9. — **Résistance à la traction du mortier de ciment.** — Les éprouvettes de mortier, immergées dans l'eau de mer au bout de

1. Les chiffres ci-dessus sont des minima; les Ingénieurs peuvent les augmenter après s'être assurés que les usines sont en mesure d'obtenir ceux qu'ils indiquent.

vingt-quatre heures, doivent présenter une résistance à la traction par centimètre carré qui sera au moins de :

6 kilogrammes au bout de 7 jours
11 — — 28 jours [1]

La résistance doit d'ailleurs augmenter au moins de 2 kilogrammes du septième au vingt-huitième jour.

ART. 10. — **Déformations à froid et à chaud.** — Les galettes et éprouvettes sont conservées dans une atmosphère humide pendant vingt-quatre heures; les galettes sont ensuite immergées dans l'eau de mer. La température de l'essai de déformation à chaud des éprouvettes est de 100°; elle est maintenue pendant trois heures. L'augmentation de l'écartement des pointes des aiguilles ne doit pas dépasser 5 millimètres.

CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 2

POUR LA FOURNITURE DE CHAUX HYDRAULIQUE DESTINÉE A DES TRAVAUX EN PRISE A LA MER

ARTICLE PREMIER. — **Définition du produit.** — La chaux est livrée en poudre fine, sans incuits ni matières étrangères.

ART. 2. — **Provenance et contrôle à l'usine.** — La chaux provient directement et exclusivement d [2].

L'Administration se réserve le droit d'exercer son contrôle à l'usine tant sur la fabrication que sur la conservation et l'expédition de la chaux qui est fournie en exécution du présent marché.

1. Même observation qu'à l'article 8 (Voir *Circulaire ministérielle du 20 novembre 1904*).

2. S'il s'agit d'un marché de fourniture : de l'usine du soumissionnaire.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi et si l'importance de la fourniture ou la nature du travail à exécuter exige que l'on précise l'origine de la chaux : de l'une des usines ci-après... ou d'autres fournissant couramment des produits d'une qualité que les Ingénieurs reconnaissent au moins égale.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi sans qu'il y ait lieu de préciser l'origine de la chaux : d'une usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'Ingénieur.

Elle peut y installer des agents spéciaux en permanence.

ART. 3. — **Mode de livraison.** — La chaux est livrée (en sacs ou barils).

ART. 4. — **Composition chimique.** — La chaux doit contenir moins de 2 0/0 d'alumine, plus de 20 0/0 de silice combinée, et ne pas perdre plus de 10 0/0 de son poids par la calcination au rouge blanc.

Ces chiffres ne sont pas obligatoires pour les chaux qui ont subi avec succès les essais à la mer effectués par la Commission des chaux et ciments sur la demande des fabricants désireux de présenter leurs produits aux adjudications de travaux à la mer.

ART. 5. — **Finesse de mouture.** — La chaux doit laisser au plus 5 0/0 de son poids sur le tamis de 900 mailles par centimètre carré et 2 0/0 sur le tamis de 324 mailles.

ART. 6. — **Densité apparente.** — Le poids du litre de chaux doit être supérieur à 700 grammes ; pour la chaux provenant d'une même usine, la variation du poids du litre ne peut dépasser 100 grammes.

ART. 7. — **Durée de prise.** — La pâte de chaux, immergée dans l'eau de mer, doit avoir commencé à faire prise dans un délai de six heures et avoir fait complétement prise dans un délai de trente heures au plus.

ART. 8. — **Résistance à la traction du mortier de chaux.** — Les éprouvettes de mortier, immergées dans l'eau de mer au bout de vingt-quatre heures, doivent présenter une résistance à la traction par centimètre carré qui est au moins de :

3 kilogrammes au bout de 7 jours
6 — — 28 jours [1]

La résistance doit augmenter d'ailleurs au moins de 2 kilogrammes du septième au vingt-huitième jour.

ART. 9. — **Déformations à froid et à chaud.** — Les galettes et éprouvettes sont conservées dans une atmosphère humide pendant quarante-huit heures. Ensuite on immerge les galettes dans de l'eau de mer. La température de l'essai de déformation à chaud des éprouvettes est de 100° et est maintenue pendant trois heures.

L'augmentation de l'écartement des pointes des aiguilles ne doit pas dépasser 5 millimètres.

1. Les chiffres ci-dessus sont des minima ; les ingénieurs peuvent les augmenter après s'être assurés que les usines sont en mesure d'obtenir ceux qu'ils indiquent.

CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 3

POUR LES FOURNITURES DE CIMENTS PORTLAND DESTINÉES A DES TRAVAUX NON EN PRISE A LA MER

ARTICLE PREMIER. — **Définition du produit.** — Le ciment Portland est produit par la mouture d'un mélange intime de carbonate de chaux, silice, alumine et fer cuit jusqu'à ramollissement.

ART. 2. — **Provenance et contrôle à l'usine.** — Le ciment provient directement et exclusivement d [1].

L'Administration se réserve le droit d'exercer son contrôle à l'usine tant sur la fabrication que sur la conservation et l'expédition du ciment qui est fourni en exécution du présent marché.

Elle peut y installer des agents spéciaux en permanence.

ART. 3. — **Mode de livraison.** — Le ciment est livré (en sacs ou en barils).

ART. 4. — **Composition chimique.** — Le ciment ne doit pas contenir plus de 3 0/0 d'acide sulfurique, ni plus de 5 0/0 de magnésie, ni plus de 10 0/0 d'alumine, ni des sulfures en proportions dosables.

ART. 5. — **Finesse de mouture.** — Le ciment doit laisser au plus 30 0/0 de son poids sur le tamis de 4.900 mailles par centimètre carré et 10 0/0 sur le tamis de 900 mailles.

ART. 6. — **Densité apparente.** — Le poids du litre de ciment est de 1.100 grammes au moins.

ART. 7. — **Durée de prise.** — Le ciment immergé dans de l'eau potable ne doit pas commencer à faire prise avant un délai de vingt minutes.

1. S'il s'agit d'un marché de fourniture : de l'usine du soumissionnaire.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi et si l'importance de la fourniture ou la nature du travail à exécuter exige que l'on précise l'origine du ciment : de l'une des usines ci-après... ou d'autres fournissant couramment des produits d'une qualité que les Ingénieurs reconnaissent au moins égale.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi sans qu'il y ait lieu de préciser l'origine du ciment : de l'usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'Ingénieur.

La prise doit être complètement terminée dans un délai qui n'est pas inférieur à deux heures ni supérieur à douze heures.

ART. 8. — **Résistance à la traction du ciment pur.** — Les éprouvettes de ciment pur, immergées dans de l'eau potable au bout de vingt-quatre heures, doivent présenter une résistance à la traction par centimètre carré qui est au moins de :

25 kilogrammes au bout de 7 jours
35 — — 28 jours [1]

La résistance doit augmenter d'ailleurs au moins de 3 kilogrammes du septième au vingt-huitième jour.

ART. 9. — **Résistance à la traction du mortier de ciment.** — Les éprouvettes de mortier, immergées dans de l'eau potable au bout de vingt-quatre heures, doivent présenter une résistance à la traction par centimètre carré qui est au moins de :

8 kilogrammes au bout de 7 jours
15 — — 28 jours [2]

La résistance doit augmenter d'ailleurs au moins de 2 kilogrammes du septième au vingt-huitième jour.

ART. 10. — **Déformations à chaud.** — Les éprouvettes sont conservées dans une atmosphère humide pendant vingt-quatre heures. La température de l'essai est de 100° et est maintenue pendant trois heures. L'augmentation de l'écartement des pointes des aiguilles ne peut dépasser 10 millimètres.

CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 4

POUR LES FOURNITURES DE CIMENTS DE GRAPPIERS

ARTICLE PREMIER. — **Définition du produit.** — Le ciment de grappiers est produit par la mouture des grappiers formant le résidu de la fabrication des chaux bien cuites, séparés de ces dernières par des extinctions et des blutages successifs.

1. Les chiffres ci-dessus sont des minima; les Ingénieurs peuvent les augmenter après s'être assurés que les usines sont en mesure d'obtenir ceux qu'ils indiqueront.
2. Même observation.

ART. 2. — **Provenance et contrôle à l'usine.** — Le ciment provient directement et exclusivement d [1].

L'Administration se réserve le droit d'exercer son contrôle à l'usine tant sur la fabrication que sur la conservation et l'expédition du ciment qui est fourni en exécution du présent marché. Elle peut y installer des agents spéciaux en permanence.

ART. 3. — **Mode de livraison.** — Le ciment est livré (en sacs ou en barils).

ART. 4. — Le ciment ne doit pas contenir plus de 1,5 0/0 d'acide sulfurique, ni plus de 5 0/0 de magnésie, ni moins de 22 0/0 de silice combinée. Si le ciment est destiné à des travaux en prise à la mer, on stipule en outre qu'il ne doit pas contenir plus de 3 0/0 d'alumine.

Ces chiffres ne sont pas obligatoires pour les ciments qui ont subi avec succès les essais effectués par la Commission des chaux et ciments sur la demande des fabricants désireux de présenter leurs produits aux adjudications de travaux publics.

ART. 5. — **Finesse de mouture.** — Le ciment doit laisser au plus 30 0/0 de son poids sur le tamis de 4.900 mailles par centimètre carré et 10 0/0 sur le tamis de 900.

ART. 6. — **Durée de prise.** — Le ciment immergé dans de l'eau potable doit avoir commencé à faire prise dans un délai de cinq heures et avoir fait complètement prise dans un délai de quatorze heures.

ART. 7. — **Résistance à la traction du mortier de ciment.** — Les éprouvettes de mortier, immergées dans l'eau potable au bout de vingt-quatre heures, doivent présenter une résistance à la traction par centimètre carré qui est au moins de :

8 kilogrammes au bout de 7 jours
12 — — 28 jours [2]

1. S'il s'agit d'un marché de fourniture : de l'usine du soumissionnaire.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi et si l'importance de la fourniture ou la nature du travail à exécuter exige que l'on précise l'origine du ciment : de l'une des usines ci-après...

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi sans qu'il y ait lieu de préciser l'origine du ciment : de l'usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'Ingénieur.

2. Les chiffres ci-dessus sont des minima ; les Ingénieurs peuvent les augmenter après s'être assurés que les usines sont en mesure d'obtenir ceux qu'ils indiquent.

Si le ciment est destiné à des travaux en prise à la mer, les résistances exigées à sept et à vingt-huit jours sont portées respectivement à 10 et à 15 kilogrammes.

La résistance doit d'ailleurs augmenter au moins de 2 kilogrammes du septième au vingt-huitième jour.

ART. 8. — **Déformations à froid et à chaud.** — Les galettes et éprouvettes sont conservées dans une atmosphère humide pendant vingt-quatre heures. Ensuite on immerge les galettes dans l'eau de mer pour les travaux en prise à la mer. La température de l'essai de déformation à chaud des éprouvettes est de 100° et est maintenue pendant trois heures. L'augmentation de l'écartement des pointes des aiguilles ne doit point dépasser 5 millimètres pour les travaux à la mer et 10 millimètres pour les autres travaux.

CAHIER DES CHARGES-TYPE N° 5

POUR LA FOURNITURE DE CIMENTS ET DE CHAUX HYDRAULIQUES NE RENTRANT PAS DANS LES CATÉGORIES POUR LESQUELLES DES CAHIERS DES CHARGES SPÉCIAUX SONT PRÉVUS

ARTICLE PREMIER. — **Définition du produit.** — . . . . . .

ART. 2. — **Provenance et contrôle à l'usine.** — L..... provient directement et exclusivement d [1].

L'Administration se réserve le droit d'exercer son contrôle à l'usine tant sur la fabrication que sur la conservation et l'expédition d..... qui est fourni en exécution du présent marché.

Elle peut y installer des agents spéciaux en permanence.

ART. 3. — **Mode de livraison.** — L..... est livré (en sacs ou en barils).

1. S'il s'agit d'un marché de fourniture : de l'usine du soumissionnaire.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi et si l'importance de la fourniture ou la nature du travail à exécuter exige que l'on précise l'origine de l.....: de l'une des usines ci-après..... ou d'autres fournissant couramment des produits d'une qualité que les Ingénieurs reconnaissent au moins égale.

S'il s'agit d'un marché de travaux comprenant la fourniture et l'emploi sans qu'il y ait lieu de préciser l'origine de l..... : d'une usine choisie par l'entrepreneur et agréée par l'Ingénieur.

ART. 4. — **Composition chimique.** — L..... ne doit pas contenir plus de..... 0/0 d'acide sulfurique, moins de..... 0/0 de silice combinée, ni perdre plus de..... 0/0 par la calcination au rouge blanc.

Son indice d'hydraulicité, c'est-à-dire le rapport entre les poids de la silice combinée et de l'alumine, d'une part, et le poids de la chaux et de la magnésie, d'autre part, est au moins de .

ART. 5. — **Finesse du blutage.** — L..... doit laisser au plus 10 0/0 de son poids sur le tamis de 900 mailles par centimètre carré et 2 0/0 sur le tamis de 324 mailles.

ART. 6. — **Densité apparente.** — Le poids du litre doit être supérieur à ..... grammes.

ART. 7. — **Durée de prise.** — La pâte d....., immergée dans de l'eau potable, doit avoir fait complètement prise dans un délai qui n'est pas inférieur à ..... ni supérieur à.....

ART. 8. — **Résistance à la traction de la pâte de ..... pur.** — Les éprouvettes de ..... pur, immergées dans l'eau potable au bout de ..... heures, doivent présenter une résistance à la traction par centimètre carré qui est au moins de ..... kilogrammes au bout de sept jours et de ..... kilogrammes au bout de vingt-huit jours.

ART. 9. — **Résistance à la traction du mortier de .....** — Les éprouvettes de mortier, immergées dans l'eau potable au bout de ..... heures, doivent présenter une résistance à la traction par centimètre carré qui est au moins de ..... kilogrammes au bout de sept jours et de ..... kilogrammes au bout de vingt-huit jours.

ART. 10 — **Déformations à froid et à chaud.** — Les galettes et éprouvettes sont conservées dans une atmosphère humide pendant ..... heures. Ensuite on immerge les galettes dans l'eau de mer lorsque l..... doit être employé dans des travaux en prise à la mer.

La température de l'essai de déformation à chaud est de 50°, elle est maintenue pendant dix heures.

L'augmentation de l'écartement des pointes des aiguilles ne doit pas dépasser 5 millimètres.

II. — TRASS ET POUZZOLANES

On désigne sous le nom de pouzzolanes des produits jouissant de propriétés hydrauliques, et dont les composés principaux sont l'argile et l'oxyde ferrique mélangés à une petite quantité de chaux, de potasse, de soude et de magnésie.

Il y a des pouzzolanes naturelles et des pouzzolanes artificielles.

Les pouzzolanes naturelles, dont la composition est analogue à celle des argiles, proviennent de la décomposition de certaines roches primitives. Ce sont des argiles plus ou moins calcinées. D'autres substances naturelles ont également des propriétés pouzzolaniques : ce sont les arènes, les psammites, les gaizes, etc.

Les arènes, que l'on rencontre très souvent sur le sommet des collines peu élevées de la Champagne et du Périgord, possèdent une action pouzzolanique due à la présence de l'argile. On exalte cette action par une légère calcination du produit.

Les psammites sont constitués par la réunion de grains de quartz, de mica, de feldspath et de schiste agglutinés. Les schistes du Finistère ne sont autre chose que des psammites de couleur jaune, rouge ou brune; ils sont onctueux au toucher et donnent avec l'eau une pâte argileuse.

Le trass de Hollande, que l'on rencontre surtout à Brohl, près d'Andernach, dans la vallée du Rhin, est une pouzzolane énergique de couleur bleue, jaune ou brune.

Les départements du Puy-de-Dôme, du Cantal, de la Haute-Vienne et de la Haute-Loire contiennent des gisements de pouzzolane. On en trouve dans les terrains volcaniques brûlants et à cratère. Entre deux coulées de lave il n'est pas rare d'en rencontrer des couches puissantes.

Certaines matières naturelles, comme l'ardoise bleue (schistes de Hainneville, près Cherbourg), chauffées au rouge blanc, fournissent des scories que l'on pulvérise et que l'on emploie comme pouzzolane.

Il existe en outre des pouzzolanes artificielles. Parmi elles,

on peut citer les débris de briques et de tuiles qui, pulvérisés, servent à fabriquer le ciment de tuileau. On peut dire que ce ciment est à peu près complètement abandonné de nos jours. La pouzzolane artificielle la plus employée provient de la calcination d'argiles chauffées vers 600 ou 700°. Cette pouzzolane est poreuse, et l'hydraulicité qu'elle acquiert dépend beaucoup du mode de cuisson.

Quelle que soit leur origine, les pouzzolanes doivent être mélangées à de la chaux grasse pour former un composé susceptible de durcir sous l'eau. Elles contiennent de 61 à 90 0/0 d'argile et de 39 à 40 0/0 de chaux et autres corps. Leur couleur est variable : elle est blanche, jaune, grise, brune, noire ou violette.

Quant au trass, il présente en général une teinte gris rougeâtre. Pour être de bonne qualité, il doit être fin, bien sec, exempt de matières étrangères. Il n'est pas facile de reconnaître au seul aspect du produit la pureté d'un trass réduit à l'état de poudre. Néanmoins, comprimé dans la main et immergé ainsi dans l'eau, il ne doit pas laisser surnager de poussière ; si on retire la main, il doit rester en masse et ne pas se délayer. Un mortier composé de 1 partie de trass, 1,5 partie de chaux vive et 0,5 partie d'eau doit durcir rapidement sous l'eau.

Par synthèse, on reproduit un trass artificiel d'excellente qualité en soumettant à la cuisson, dans un four à réverbère porté au rouge, un mélange fait dans les proportions suivantes :

Silice	57
Alumine	28
Carbonate de calcium	5,60
Oxyde ferrique	8,50

ANALYSE CHIMIQUE

L'analyse chimique des pouzzolanes naturelles et des trass s'effectue de la même façon que celle des pouzzolanes artificielles. On dose successivement l'eau hygrométrique, la perte au feu, l'anhydride carbonique, le sable quartzeux, la

silice, l'alumine, l'oxyde ferrique, la chaux, la magnésie, les alcalis.

Eau hygrométrique. — Cinq grammes de pouzzolane sont laissés pendant deux heures à l'étuve, à la température de 110°. La différence de poids représente l'eau hygrométrique.

Un autre procédé plus rigoureux consiste à dessécher la pouzzolane sous une cloche dans laquelle on fait le vide au moyen de la machine pneumatique.

Perte au feu. — Trois grammes de matière sont placés dans un creuset de platine et portés au rouge vif pendant dix minutes. La différence de poids observée constitue la perte au feu, comprenant l'eau hygrométrique, l'eau combinée, les matières charbonneuses et bitumineuses.

Anhydride carbonique. — On emploie pour cette détermination des appareils tels que ceux de Berzélius et de Rose. Ces instruments sont basés sur le dégagement de l'anhydride carbonique au moyen de l'acide chlorhydrique.

Sable quartzeux. — On opère la lévigation sur 200 grammes de matière. Le sable plus ou moins grossier obtenu peut être mélangé de quelques grains de carbonate de calcium ou de dolomie. Dans ce cas, il convient de reprendre le résidu, que l'on met en contact prolongé avec l'acide chlorhydrique étendu ; après lavage, on reprend ce nouveau résidu que l'on considère comme étant du sable quartzeux.

Une autre méthode analytique plus exacte consiste à attaquer, dans un creuset en porcelaine, la pouzzolane pulvérisée par l'acide sulfurique dilué, à la température de 100°. On dissout ainsi les carbonates de calcium et de magnésium, les hydrates d'oxyde de fer, etc., que l'on peut d'ailleurs doser séparément. On obtient un résidu composé de silicates et de quartz. Ce résidu est ensuite soumis, pendant quinze à vingt heures à la température de 300°, à l'action de l'acide sulfurique concentré. Les hydrosilicates d'aluminium et le mica pulvérulent se sont dissous.

Le résidu obtenu, formé de quartz, de mica grossier et de feldspath, est soumis à un lavage, qui a pour but d'éliminer

les petites quantités de mica qui demeurent assez longtemps en suspension. On obtient une matière composée presque entièrement de quartz.

Silice. — Deux grammes de pouzzolane séchée à 120° sont mélangés avec 10 grammes de carbonate de sodium, dans un creuset de platine que l'on chauffe progressivement de manière à obtenir la fusion tranquille. Lorsque la réaction paraît terminée, on refroidit brusquement le creuset, en le plaçant sur une surface froide ou dans l'eau, ce qui facilite ultérieurement le détachement du culot qui se forme par le refroidissement. On reprend ce culot par l'eau et par l'acide chlorhydrique dans une capsule en porcelaine ; on évapore à sec. On fait une seconde reprise à l'eau chaude acidulée. Le résidu filtré est desséché, calciné et pesé ; c'est la silice.

Alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie, alcalis. — Ces divers éléments se dosent comme il a été indiqué à propos de l'analyse des chaux et des ciments.

Le tableau de la page 304 donne la composition de quelques pouzzolanes naturelles. Une partie des renseignements qu'il contient provient des documents publiés par M. Debauve, inspecteur général des ponts et chaussées.

L'examen attentif de ce tableau montre que les trass et les pouzzolanes de Santorin et de la Guadeloupe contiennent une plus forte proportion de silice que les autres produits du même genre. La pouzzolane de Santorin, qui contient 66,80 0/0 de silice sous forme de silicates acides, a une composition analogue à celle de la roche feldspathique.

Pour l'emploi, il faut pulvériser la pouzzolane ou le trass aussi bien que possible. Cette pulvérisation doit se faire de préférence sur le chantier plutôt que sur le lieu d'exploitation. On évite ainsi plus facilement l'addition de substances étrangères ou inertes introduites dans un but de fraude.

DÉSIGNATION DES POZZOLANES	SABLE	SILICE	ALUMINE	MAGNÉSIE	OXYDE DE FER[1]	CHAUX	EAU ET MATIÈRES VOLATILES	ALCALIS
Trass de Hollande	8,7	46,25	20,71	1 »	5,48	2,15	9,25	6,30
Andernach, Andernach		62,80	12,80	0,30	3,05	1,75	13,50	5,90
		61,80	14,20	0,35	3,15	1,30	13,75	6,7
Brohl		71,90	13,50	0,40	—	0,80	7,50	4,70
Pouzzolane brune du Vésuve	20 »	47,50	15,75	traces	10,50	8,20	3,50	11 »
— gris foncé	1,50	44,50	16,50	3 »	15,50	10 »	5 »	5 »
— gris clair	2,50	42 »	15,50	4,50	12,50	9,50	11,50	10,25
— gris du Vivarais	3,95	35,00	17,05	3,17	16,82	4,26	19,06	» »
— brune de l'Hérault	4,50	38,50	18,35	»	14,90	8,70	7,75	7,30
— brune du Vivarais	7,48	40,73	11,64	2,49	25,92	3,73	10,02	»
— de Saucats	»	66,80	13,17	0,83	5,24	4,03	1,50	7,32
de la Guadeloupe	»	56 »	29 »[1]	»	»	8 »	2,60	4,30
d'Auvergne	»	40,50	37 »[1]	2,70	»	8,90	2 »	7,5
de Travachaire	»	48,30	36,30	traces	»	8,10	2,50	4,80

1. Y compris l'oxyde ferrique.
La potasse et la soude de la pouzzolane du Vivarais, si elle en renferme, sont comprises avec l'eau.

ESSAIS

ESSAIS DES TRASS

§ 1er. **Préparation des échantillons.** — Les échantillons destinés aux essais doivent être amenés à l'état pulvérulent.

La poudre doit laisser un résidu inférieur à 25 0/0 sur le tamis de 900 mailles et un résidu compris entre 40 et 50 0/0 sur le tamis de 4 900 mailles; les gros grains retenus par les tamis sont soumis à un nouveau broyage jusqu'à ce que ces conditions de finesse soient remplies.

§ 2. **Finesse de mouture, poids spécifique, densité apparente et analyse chimique.** — Comme pour les ciments §§ 1er, 2, 3 et 4.

§ 3. **Essais d'homogénéité.** — A. La *loupe* peut être utilement employée pour donner des indications sur le degré d'homogénéité des trass.

Les dispositions indiquées pour les ciments (§ 5) sont applicables dans l'espèce.

B. La teneur en pierre ponce et en matières terreuses peut être appréciée par un essai dit de *clarification*. A cet effet, on verse le trass dans l'eau et on agite vivement; le trass se précipite, les matières terreuses troublent l'eau, et la pierre ponce vient flotter à la surface.

§ 4. **Confection des pâtes et mortiers normaux.** — *a*) Les essais normaux des pâtes et mortiers de trass portent sur la *pâte normale de trass et de chaux* et sur le *mortier normal de trass, de chaux et de sable.*

b) On emploie, pour la confection de ces pâtes et mortiers, la chaux grasse, pure, éteinte, provenant de la calcination du marbre, le sable normal composé et l'eau potable.

On opère sur 1 kilogramme de matières sèches, qui sont gâchées suivant le procédé indiqué pour les ciments et chaux hydrauliques.

c) Pour la *pâte normale de trass et de chaux*, on gâche 666 grammes de trass et 334 grammes de chaux en poudre avec une quantité d'eau telle que l'épaisseur de la couche de mortier non traversée par la sonde de consistance, dans les conditions indiquées plus haut (§ 6, A), soit de 30 millimètres.

Pour le *mortier normal de trass, de chaux et de sable*, on gâche 333 grammes de trass, 167 grammes de chaux en poudre et 500 grammes de sable, avec la quantité d'eau nécessaire pour que le mortier ait une consistance plastique (§ 6, 2°, B, *d*).

§ 5. **Essais de prise.** — 1° *Pâtes de trass et de chaux.* — Mêmes conclusions que pour les ciments (§ 7, 1°); en outre, on complète les indications relatives à la prise en faisant connaître les surcharges qu'il a fallu placer sur l'aiguille

Vicat, pour obtenir un enfoncement de 5 millimètres au bout de deux, trois, quatre et cinq jours.

2° *Mortiers de trass, de chaux et de sable.* — A. Comme pour les ciments (§ 7, 2°, A).

B. L'*essai normal* de prise porte sur le mortier normal de trass, de chaux et de sable immergé (§ 7, 2°, A, *b*).

§ 6. **Essais de rupture** (*traction, compression, flexion*). — Mêmes conclusions que pour les ciments (§ 8, 9 et 10), sauf les modifications ci-après :

a) Les éprouvettes sont démoulées au bout de vingt-quatre heures, et exposées dans le milieu choisi pour leur conservation, après avoir été maintenues à l'air pendant un délai de deux, quatre ou sept jours comptés à partir du moment de la confection.

Dans tous les cas, il est fait mention de ce délai, en même temps qu'on indique les résultats des essais.

b) Les *essais normaux* de rupture portent sur la *pâte normale de trass et de chaux* et sur le *mortier normal de trass, de chaux et de sable* conservés dans l'eau douce.

Ce mortier étant plastique, on confectionne les éprouvettes conformément aux règles indiquées (§ 8, A, *b*).

§ 7. **Essais de rendement, de porosité, de perméabilité, de décomposition par l'eau de mer et d'adhérence.** — Comme pour les chaux hydrauliques (§ 9, 10 et 11).

L'*essai normal* de rendement porte sur la pâte normale de trass et de chaux, et pour les autres *essais normaux* on opère sur le mortier normal de trass, de chaux et de sable.

Les essais ci-dessus sont applicables aux trass.

Pour les pouzzolanes naturelles, il n'y a pas de prescriptions générales.

La Commission des méthodes d'essai recommande, en l'absence de données suffisantes, d'appliquer aux pouzzolanes les procédés employés pour les trass, en y apportant les modifications reconnues utiles.

Les renseignements suivants, extraits des documents publiés par M. Dardenne, ingénieur des Ponts et Chaussées, ont été réunis sous la forme de tableaux :

DOSAGES COMMUNÉMENT ADOPTÉS (*en volumes*)

	TRASS														POUZZOLANES			
	FRANCE (Dunkerque-Calais)			BELGIQUE		HOLLANDE						ALLEMAGNE				ITALIE		
						Stenkalk			Schelpkalk									
Trass	2,5	3	3,5	2	4	2	2	2	2	2	2	2	3	4	Pouzzolane de Rome ou de Bacoli	1	2	3
Chaux	5[1]	6[1]	7[1]	6[2]	6[2]	6	4	3	6	4	2	3[3]	3[3]	3[3]	Chaux en pâte	1	1	2
Sable	6,5	5	3,5	4	2 ou 0	4	2	—	3,5	1	—	4	3	2	Sable	1	—	—

1. Chaux éminemment hydraulique.
2. Chaux hydraulique ordinaire.
3. Chaux hydraulique en poudre.

ESSAIS A LA TRACTION ET A LA COMPRESSION (M. HERFELDT)

Dosage des mortiers en volume											
	Trass	1	1	1	1	4	4	4	4	4	Dans ce tableau, les 4 premiers essais correspondent à de la chaux grasse en pâte, et les 5 derniers à une chaux éminemment hydraulique.
	Chaux	1	1	1	1	2	2	2,5	2,5	4	
	Sable	1	2	3	4	0	2	2	2	4	
Résistance moyenne à la traction après 6 semaines.		14k,8	15k	3k,5	12k,2	—					
— — à la compression après 6 sem.		94k,9	95k	111k,8	98k,8	—					
— — à la traction à 28 jours		—	—	—	—	14k	13k	14k,2	13k,6	14k,6	

CHAPITRE XX

PLATRES

Le plâtre provient de la calcination du sulfate de calcium hydraté ou gypse : $SO^4Ca + 2H^2O$ [1].

Le gypse se trouve en couches puissantes dans le système triasique, au voisinage du sel gemme, ainsi que dans le terrain tertiaire de Paris (Montmartre, Belleville, Pantin, Mon-

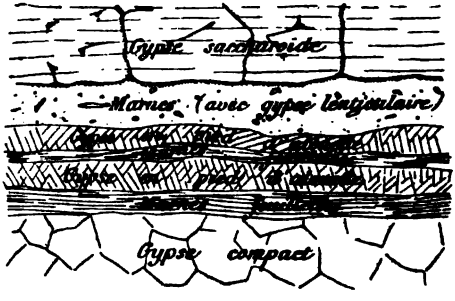

Fig. 106. — Coupe du bassin parisien (gypse).

reuil-sous-Bois), où il forme des assises de grande épaisseur dont l'exploitation se poursuit d'une façon méthodique. On constate sa présence, sous forme d'amas lenticulaires, dans

1. Il existe encore un sulfate de calcium anhydre, désigné en minéralogie sous le nom de *karsténite* ou d'*anhydrite*, SO^4Ca, que l'on rencontre dans les terrains anciens.

les marnes irisées, ou encore, sous forme de cristaux isolés ou de veinules, dans certains filons, dans des couches de lignite ou de houille et dans certains dépôts de minerais de fer. La figure 106 représente la coupe générale des différents bancs aux environs de Paris.

Au point de vue de son exploitation dans le bassin de Paris, on distingue :

La *première masse*, ou masse superficielle, qui est la plus importante puisqu'en certains endroits elle a plus de 20 mètres d'épaisseur. Elle est souvent située au-dessous de la terre végétale. On y rencontre, dans la partie inférieure, des silex, des ossements d'oiseaux ou de quadrupèdes, des os de tortues, des arêtes de poissons, des coquilles d'eau douce et des squelettes de mammifères. La hauteur de cette masse varie de 10 à 22 mètres. C'est là que l'on rencontre les débris du *Paléothérium* et de l'*Anoplothérium*, reconstitués par Cuvier ;

La *seconde masse*, ou masse intermédiaire, composée de bancs moins épais que ceux de la première. Ces bancs alternent avec des couches marneuses. On y trouve des poissons fossiles, du sulfate de strontium (célestine). L'épaisseur de ces bancs est de 7 à 8 mètres ;

La *masse inférieure* est formée de couches alternatives et peu épaisses de gypse cristallisé, de marnes calcaires compactes et de marnes argileuses feuilletées. On y voit de gros silex jaunâtres de gypse ayant l'aspect lenticulaire du silex ménilite, des coquilles marines et d'eau douce. Sa hauteur va de 3 à 4 mètres.

Au-dessus du gypse se trouvent successivement des bancs importants de marne blanche, calcaire ou argileuse, des bancs de marne jaunâtre feuilletée, des couches de marne argileuse verdâtre, enfin du sable argileux.

Aux désignations précédentes, généralement adoptées par les exploitants des environs de Paris, on substitue quelquefois les noms de bancs de haute masse et de bancs de basse masse. La partie supérieure de la haute masse est composée de matériaux tendres. De la basse masse s'extrait la pierre devant servir à la fabrication du plâtre de moulage ; la couche inférieure de cette masse est généralement dure.

En dehors du bassin de Paris, la France possède de nombreux gisements de gypse, principalement en Seine-et-Oise, Seine, Seine-et-Marne, Saône-et-Loire, Marne, Landes, Basses-Pyrénées, Côte-d'Or, Jura, Ain, Isère, Ariège, Gers, Charente, Alpes-Maritimes, Bouches-du-Rhône, Vaucluse, Hérault, Aude, Dordogne, Savoie. Le plus grand producteur français est le département de Seine-et-Oise, qui fournit annuellement 600.000 tonnes sur une production totale, en France, de 1.600.000 tonnes. Les deux départements de Seine et Seine-et-Marne livrent par an 550.000 tonnes de plâtre.

A l'étranger, les gisements les plus connus existent en Suisse, en Italie, en Espagne, en Angleterre, en Allemagne, en Sicile, en Grèce.

L'*albâtre gypseux* est une pierre à plâtre qui ne fait pas effervescence avec les acides. C'est la seule espèce de gypse utilisée comme pierre de construction ; elle sert à la décoration intérieure des édifices. Quant aux autres variétés de gypse, leur résistance est insuffisante pour qu'on puisse utilement les employer à l'édification des bâtiments.

Le *stuc* est un mélange de plâtre et de colle forte. La dureté de cet aggloméré est plus grande que celle du plâtre, mais sa prise est moins rapide. Il est susceptible d'acquérir un beau poli. L'addition d'oxydes colorés donne des stucs imitant les marbres ; ces produits sont utilisés dans la décoration des intérieurs d'habitations. A l'extérieur, il est plus avantageux de remplacer cette matière par le *plâtre aluné*, plâtre trempé dans de l'alun de potasse à 10 0/0, puis cuit au rouge sombre.

Le gypse cristallise dans le système clinorhombique et affecte quelquefois la forme bien connue du fer de lance ; sa structure peut être lamellaire, compacte, granulaire ou fibreuse. Le gypse lamellaire présente trois plans de clivage distincts ; l'un de ces plans offre une plus grande facilité de division que les deux autres et permet d'obtenir de très minces lamelles incolores et transparentes. Il possède la double réfraction à deux axes.

Le gypse se trouve aussi en masses compactes, de couleur blanc jaunâtre, de texture saccharoïde ; on le désigne commu-

nément sous le nom de *pierre à plâtre*. L'examen au microscope y fait découvrir une infinité de petits cristaux enchevêtrés.

Le plâtre est légèrement soluble dans l'eau ; il est insoluble dans l'alcool. Il est très soluble dans l'hyposulfite de sodium. A l'état anhydre, sa densité varie de 2,26 à 2,31. Sa densité apparente à l'état hydraté diffère suivant sa compacité, ainsi que le montrent les chiffres suivants :

Plâtre gâché pur.....	1,40
Plâtre gâché humide.....	1,59

A l'état de pureté, le plâtre est blanc.

Souvent il présente une coloration grise, jaune, rouge ou rose, due à la présence d'impuretés.

Si l'on soumet le gypse à des températures successivement croissantes, on constate qu'entre 110° et 135° il perd ses deux molécules d'eau et devient anhydre. Par le refroidissement il peut reprendre son eau de cristallisation, en dégageant une grande quantité de chaleur. Si la température atteinte est de 160 à 180°, il reprend moins rapidement cette même eau. Au rouge cerise, il ne s'hydrate plus en refroidissant. Enfin, au rouge blanc, il subit le phénomène de la fusion et se transforme en une masse cristalline.

La cuisson du gypse demande une température relativement basse, 80° à 200°. Par sa déshydratation la pierre perd environ 18 0/0 de son poids.

Les morceaux retirés du four attendent cinq ou six jours avant d'être pulvérisés. Ce broyage s'exécute dans des moulins à noix, à grille ou à ramasseur.

Le plâtre cuit et pulvérisé doit être conservé dans un endroit sec ; sinon, il s'*évente*, par suite de l'absorption de l'humidité atmosphérique, et il ne fait plus prise avec l'eau. D'ailleurs le plâtre doit être employé dans les quinze jours qui suivent sa fabrication, si l'on veut en retirer son maximum d'efficacité.

A l'état de poudre et gâché avec son volume d'eau, le plâtre fait prise en quelques instants. Cette prise donne lieu aux quatre phénomènes suivants :

1° Le plâtre absorbe l'eau et passe de l'état anhydre à l'état hydraté;

2° Une cristallisation confuse se produit; des milliers de petits cristaux se forment presque instantanément et, s'enchevêtrant les uns dans les autres, donnent naissance à une masse solide;

3° Il y a production de chaleur, résultant de l'abandon par l'eau, passant à l'état solide, d'une partie de sa chaleur latente, ainsi que cela se constate quand un corps moins dense passe à un état plus dense;

4° Enfin il se produit un gonflement dû à l'augmentation de volume résultant de la cristallisation confuse et rapide. Les cristaux n'ont pas le temps nécessaire de s'orienter. On constate alors que la dilatation exercée est d'environ le cinquième du volume de la masse expérimentée.

Diverses hypothèses ont été émises pour expliquer ces phénomènes. La théorie la plus généralement acceptée admet deux phases distinctes, quoique presque simultanées. Dans la première phase, les molécules de sulfate de calcium anhydre, gâchées avec l'eau, se dissolvent et s'hydratent en donnant naissance à une solution sursaturée. Dans la deuxième phase, cette solution laisse déposer des cristaux de sulfate de calcium hydraté, qui vont en augmentant de volume et finissent par se souder les uns aux autres, ainsi que le font tous les cristaux se déposant lentement au sein d'une dissolution saline. La cristallisation ne cesse que quand il n'existe plus de sel anhydre.

Les phénomènes complexes de la prise du plâtre sont d'une observation assez délicate. Cependant on se rend compte de la naissance des cristaux en opérant de la façon suivante :

Sur une plaque de verre mince, on dispose un peu de plâtre, que l'on additionne d'une égale quantité d'eau distillée. On en opère rapidement le mélange et on recouvre cette plaque d'une autre plaque de verre que l'on fait glisser sur la première, tout en lui imprimant une légère pression. On porte le tout sur le porte-objet du microscope. On constate, au bout de quelques instants, la formation de petits cristaux enchevêtrés, dont le nombre s'accroît rapidement

et qui apparaissent brillants sur un fond blanc mat. La combinaison s'achève, et les molécules d'eau finissent par disparaître complètement.

Le rendement du plâtre gâché est variable. On peut admettre qu'en général 1 mètre cube de plâtre en poudre fournit $1^{m3},18$ de pâte.

Ce maximum de gonflement se produit après vingt-quatre heures, il est de 1 0/0. La moitié de l'augmentation de volume se constate une heure après la mise en œuvre.

Le mètre cube de plâtre pèse de 1.200 à 1.600 kilogrammes.

Gâché avec de l'ocre jaune, le plâtre prend la couleur de la pierre. Si l'on se sert d'ocre brune ou rouge, on obtient un ton de brique. Enfin, de l'ocre jaune additionnée d'un peu de noir lui communique une teinte de granit.

La qualité du plâtre se reconnaît à la rapidité de la prise. En général la durée de la prise est en raison directe de la température à laquelle s'est effectuée la cuisson. Un enduit dur et sonore est encore un indice de la bonne qualité du produit employé.

Mis en contact avec le fer, le plâtre en provoque l'oxydation. Cela provient de la décomposition partielle du plâtre et de la mise en liberté de ses éléments, l'acide sulfurique attaquant le métal. C'est la raison pour laquelle on doit éviter l'emploi du plâtre dans les scellements.

Le plâtre destiné aux enduits et aux plafonds est choisi parmi les produits les mieux cuits, que l'on pulvérise finement.

La démolition de maisons ou de certains ouvrages fournit les *plâtras*. Quand ces matériaux contiennent du salpêtre, ils sont inutilisables pour la construction; on les envoie aux décharges publiques. S'ils sont exempts de ce sel, on emploie des parties blanches à la confection d'ouvrages légers à l'intérieur des bâtiments; les parties noires provenant des cheminées servent à l'édification des murs extérieurs.

Le plâtre s'emploie quelquefois gâché avec de la chaux; cette dernière matière en améliore d'ailleurs la qualité.

Dans les fondations ainsi que dans les parties humides, il est préférable de recourir à la chaux hydraulique ou au ciment, plutôt qu'au plâtre, en raison de la solubilité de celui-ci. C'est pourquoi les enduits au plâtre, convenant très

bien pour les intérieurs, doivent être remplacés par des enduits à chaux hydraulique ou ciment, quand il s'agit de l'extérieur.

La majeure partie des maisons de Paris est constituée par de grands carreaux de plâtre ou plâtras.

Le plâtre nouvellement employé donne à l'intérieur des *fraîcheurs* fâcheuses pour la santé. Il y a, en effet, évaporation de l'eau en excès provenant du gâchage. Pour remédier à cet inconvénient, on aère les pièces en été, et en hiver on installe des braseros avec tôles réfléchissant la chaleur. On ne doit habiter les pièces d'une maison neuve que quand tout le plâtre a perdu sa *graisse*, c'est-à-dire quand il est absolument sec ; l'application de la main sur la surface enduite ne doit pas donner lieu à la moindre sensation d'humidité.

On peut se rappeler l'heureux parti que l'on a tiré du plâtre pour la décoration des constructions et palais de l'Exposition universelle de 1900. Les grands palais du Champ-de-Mars étaient formés de plâtre sur métal déployé. Gâché serré, le plâtre avait été appliqué sur des treillages en fer, dont les mailles étaient espacées de 2 centimètres ; ces treillages étaient fixés sur des châssis en bois.

Une partie importante des palais et pavillons du quai d'Orsay, du Cours-la-Reine et du Trocadéro était constituée par des panneaux de plâtre cloués sur des charpentes en bois.

Le palais de l'Espagne était construit avec des treillages de fer, de plâtre et de filasse. Quant au palais des Etats-Unis, il comprenait des treillages de fer, de toile et de plâtre. Enfin le palais allemand était édifié avec un treillage plongé dans un mélange de plâtre et de chaux grasse éteinte.

L'épaisseur de ces diverses cloisons variait de 4 à 5 centimètres.

Pour les planchers destinés à former plafonds, on a quelquefois recours au plâtre armé. On établit dans ce cas un plancher provisoire sous les poutres à I. On pose le métal déployé sur les ailes inférieures. On exécute ensuite un hourdis en béton englobant complètement le treillis. Un enduit en plâtre appliqué sur la face inférieure constitue le plafond.

Avec ce procédé, on exécute encore des cloisons simples ou doubles.

Un autre usage du plâtre consiste dans son application à l'agriculture comme amendement. Ce produit fournit aux plantes de la chaux et du soufre et rend assimilable la potasse du sol. On s'en sert pour activer le développement des légumineuses, du trèfle et du sainfoin, et la croissance du tabac, de la vigne, des betteraves, etc. Il n'a pas d'action sur les céréales; son effet est peu sensible sur les récoltes sarclées et les prairies naturelles. On emploie aussi bien le plâtre cru que le plâtre cuit pour ces usages.

Quelle que soit la forme sous laquelle se présente le produit, plâtre au panier, au tamis, etc., les qualités exigées sont absolument les mêmes. On en gâche une petite quantité. Le plâtre en cet état ne doit pas s'attacher aux doigts ; il doit être onctueux et résonner à la truelle brettelée quand on le recoupe. S'il est rude au toucher, de couleur jaunâtre, à prise lente, c'est l'indice d'une mauvaise qualité. Comprimé fortement dans la main, un bon plâtre en conserve l'empreinte. S'il se déforme ou coule comme du sable, il faut le rejeter, car les enduits qu'il donne gercent facilement.

Un moyen pratique de reconnaître les incuits consiste à humecter le plâtre ; s'il est insuffisamment cuit, il se colore en jaune paille, tandis que les parties cuites présentent un aspect blanc laiteux.

ANALYSE CHIMIQUE

L'analyse s'effectue de la même façon qu'il s'agisse du gypse, du plâtre cuit employé ou en poudre. Il suffit seulement de pulvériser la matière si elle ne se trouve déjà en cet état.

Perte au feu. — Elle se détermine en introduisant 5 grammes de matière dans un creuset de platine que l'on soumet à l'action de la chaleur. On maintient la température au rouge vif pendant dix minutes environ. La différence de poids représente la perte au feu, c'est-à-dire la somme de

l'eau, de l'anhydride carbonique et des matières combustibles.

Eau. — Si la perte au feu est importante, il y a un grand intérêt à connaître les quantités respectives d'eau et d'acide carbonique contenues. On porte alors à l'étuve une certaine quantité de matière (5 grammes par exemple); on la laisse pendant deux heures à 160°. A cette température seulement, le produit abandonne son eau de combinaison. Une nouvelle pesée donne, par différence avec la première, la teneur en eau de l'échantillon.

Anhydride carbonique. — Parmi les nombreux procédés servant au dosage de l'anhydride carbonique, il en est un d'usage facile qui comporte l'emploi de l'appareil à dégagement de Berzélius et de Rose. On provoque le dégagement de la vapeur d'eau par une attaque de la substance au moyen de l'acide chlorhydrique. On retient la vapeur d'eau dans un tube à chlorure de calcium ou à ponce imbibée d'acide sulfurique. La différence entre le poids primitif et le poids final donne la quantité d'anhydride carbonique dégagée [1].

Matières combustibles. — S'il existe dans le plâtre des matières charbonneuses ou organiques, celles-ci sont données par différence entre la perte au feu et la somme de l'eau et de l'anhydride carbonique.

Anhydride sulfurique. — Deux grammes de plâtre sont mis en digestion pendant vingt-quatre heures avec une solution de carbonate d'ammonium. De temps à autre, on agite énergiquement. Une double décomposition s'opère.

Il y a production de sulfate d'ammonium soluble et de carbonate de calcium insoluble. On filtre. La liqueur filtrée est sursaturée par de l'acide chlorhydrique. On porte à l'ébullition, pour chasser les dernières traces d'anhydride carbonique. On verse ensuite du chlorure de baryum. Il se pro-

1. Voir chapitre XIII, *Pierres naturelles ; calcaires (analyse chimique)*.

duit un précipité de sulfate de baryum, que l'on filtre, que l'on dessèche, que l'on incinère et que l'on pèse. Du poids trouvé on déduit aisément la quantité d'anhydride sulfurique contenue dans l'échantillon.

Résidu insoluble dans les acides. — Le résidu resté sur le filtre dans l'opération précédente comprend :

Le carbonate de calcium formé aux dépens du sulfate de calcium ;

Le carbonate de calcium pouvant exister dans le produit ;

Le résidu insoluble dans les acides ;

L'alumine ;

L'oxyde ferrique ;

La magnésie.

Ce résidu est traité sur le filtre même par l'acide chlorhydrique étendu. Il ne reste alors sur le filtre que le résidu insoluble dans les acides, qu'on lave à l'eau distillée, que l'on dessèche, que l'on calcine et qu'enfin l'on pèse.

Alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie, perte au feu. — Dans la liqueur filtrée on dose les autres éléments, en suivant la marche d'analyse indiquée à propos des calcaires.

Dans l'analyse ainsi obtenue on attribue à l'anhydride sulfurique une quantité de chaux correspondante, et à l'anhydride carbonique la chaux restante et la magnésie.

Les analyses reproduites dans le tableau de la page 318 ont été exécutées par le laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées sur vingt-quatre plâtres français d'origine différente.

L'élément essentiel, le sulfate de calcium anhydre, se trouve dans une proportion moyenne de 80,80 0/0. Viennent ensuite par ordre d'importance : le carbonate de calcium (5,25 0/0), — l'eau et les matières volatiles autres que l'anhydride carbonique (5,06 0/0), — le résidu insoluble dans les acides (4,23 0/0), — le carbonate de magnésium (2,80 0/0), — et enfin l'alumine et l'oxyde ferrique (1,50 0/0).

DÉSIGNATION du lieu DE FABRICATION	COMPOSITION CENTÉSIMALE						OBSERVATIONS
	SULFATE DE CALCIUM	CARBONATE DE CALCIUM	CARBONATE DE MAGNÉSIUM	ALUMINE ET OXYDE FERRIQUE	RÉSIDU INSOLUBLE dans les acides	EAU, ETC.	
Région du Nord							
Vitry (Seine).....	70,90	10,20	5,05	2,50	4,90	6,45	Plâtre ordinaire.
Vitry (Seine).....	72,60	12 »	5,45	2,70	3,70	3,55	— fin.
Romainville, Pantin, Bagnolet, Noisy-le-Sec.....	87,70	2,40	2,70	0,80	0,60	5,80	— ordinaire.
Villejuif (Seine)...	77,95	8,50	1,90	0,60	4,80	6,25	
Bondy (Seine)....	79,05	9,90	2,30	1,50	1,40	5,85	
Bondy (Seine)....	83,40	6,90	2,30	1 »	2,40	4 »	— fin.
Bois-le-Comte (Seine-et-Marne).....	85,75	4,30	»	0,35	1,20	8,40	— ordinaire.
Lamarche (Seine-et-Marne).....	88,45	3,75	»	»	1,60	6,20	
Bussieres (Seine-et-Marne).....	84 »	7,15	0,40	0,45	1,05	6,95	
Région de l'Est							
Poligny (Jura)....	93,50	3,40	»	»	0,80	2,30	
Baulme-la-Roche (Côte-d'Or).....	69,35	1,85	1,50	2,40	19,40	5,50	
Région du Sud-Est							
Grasse (Alpes-Maritimes).....	95,65	»	»	0,20	0,10	4,05	Plâtre fin.
La Marseillaise (B.-du-Rhône)...	74,30	5,55	6,10	2,30	9,20	2,55	— gris.
id.	76,35	3,50	6,50	2,50	9,40	1,75	— gris blanc.
id.	85,35	4,20	3,80	1,50	2,60	2,55	— rouge.
id.	77 »	4,45	6,30	2,90	5 »	4,35	— blanc ordinaire.
Roquevaire (Bouches-du-Rhône)..	70,55	6,70	5,65	3,10	11,20	2,80	— blanc ordinaire.
id.	72,25	6,35	6,10	4,20	9,30	1,80	— blanc blutté.
id.	76,50	5,20	5,90	2,90	7,40	2,10	— blanc blutté pour décors.
Malaucène (Vaucluse).....	92,90	0,35	»	»	0,60	6,15	— blanc.
id.	86,60	1,95	»	»	3 »	8,45	— gris.
Hérépian et Villemagne (Hérault)..	81,60	»	»	1 »	4,20	13,20	
Portel (Aude).....	86,85	5,30	»	0,40	0,70	6,75	
Region du Sud-Ouest							
Bassin de la Couze (Dordogne).....	71,60	14,10	5,05	1,40	4 »	3,85	

Pour un plâtre bien cuit, passé au sas et destiné à faire des enduits, on compte qu'il faut 30 litres d'eau pour gâcher un sac de plâtre contenant 25 litres.

Pour un plâtre bien cuit, passé au panier et gâché pour hourder les maçonneries ou pour faire les crépis, il faut en moyenne 18 litres d'eau par sac de plâtre de 25 litres.

Un plâtre non assez ou trop cuit absorbe 1/8 d'eau de moins que les précédents (Claudel et Laroque).

Un fait bien connu des praticiens est que le plâtre chimiquement pur acquiert moins de dureté que les plâtres impurs. Les matières étrangères qui se trouvent dans des proportions se rapprochant des moyennes ci-dessus indiquées sont donc plutôt favorables. Ces matières inertes jouent, par rapport au plâtre, un rôle analogue à celui du sable dans les mortiers de chaux ou de ciment. Il est évident, par contre, qu'une trop grande proportion de matières étrangères compromettrait la bonne qualité du produit.

ESSAIS

Les essais de plâtres n'offrent pas, à beaucoup près, le même intérêt que présentent les essais d'autres matériaux de construction.

Cependant il peut être utile, dans certains cas, de déterminer la finesse de mouture, la durée de prise et le rendement. Ces opérations sont résumées dans les lignes ci-dessous :

A. **Finesse de mouture.** — Le degré de finesse de mouture des plâtres est déterminé à l'aide des tamis de 4.900, 900 et 324 mailles par centimètre carré, décrits ci-dessus (§ 1er), et du tamis de 144 mailles (n° 30 du commerce), en se conformant aux règles fixées pour les ciments.

B. **Analyse chimique**[1]. — Les conclusions relatives à l'analyse des ciments (§ 4) sont applicables aux plâtres.

1. Cette partie est traitée dans le présent chapitre.

C. **Essais de prise.** — On procède aux essais de prise suivant les règles fixées pour les ciments (§ 7, 1°), en opérant sur une pâte gâchée avec la quantité d'eau jugée convenable, eu égard à la nature et à la destination du plâtre soumis aux essais. On indique cette quantité, ainsi que la consistance correspondante (autant que possible par l'enfoncement de la *sonde de consistance*).

Toutes les fois que les conditions de l'essai le permettent, on emploie de préférence des dosages d'eau correspondant à 40, 50 et 60 0/0 du poids du plâtre.

D. **Essais de rendement.** — Ces essais sont faits conformément aux dispositions fixées pour les ciments (§ 12), et portent sur les pâtes employées aux essais de prise.

CHAPITRE XXI

MORTIERS ET BÉTONS

On a vu dans le chapitre XIX (*Chaux et Ciments*) que, malgré les nombreuses théories imaginées et expériences faites, l'étude de la prise et du durcissement des chaux et des ciments n'était pas encore terminée. On conçoit très bien qu'il en soit de même *a fortiori* des mortiers et des bétons, dont la composition est plus complexe encore, puisqu'ils sont formés non seulement des matériaux qui viennent d'être cités, mais de sable ou de gravier avec lesquels ils sont mélangés.

Le rôle joué par les mortiers varie naturellement avec la grosseur des matériaux à réunir. Le mortier reliant deux surfaces bien dressées comme les faces des pierres de taille offre beaucoup moins d'importance que le béton, par exemple, dont la résistance doit être comparable à celle des pierres.

Dans ce chapitre, on n'envisagera les mortiers et les bétons qu'au seul point de vue de la valeur qu'il convient de leur attribuer.

Dans la confection du mortier on doit préférer le gros sable, non seulement à cause de son prix de revient souvent moins élevé, mais aussi parce qu'il fournit un agrégat d'une résistance supérieure à celle que donne le sable fin employé dans les mêmes conditions. Il peut même y avoir avantage à faire venir d'un endroit éloigné un sable de grosseur suffisante, plutôt que d'utiliser un sable fin qui se trouverait à pied-d'œuvre, comme celui des dunes par exemple.

Dans la pratique, les sables siliceux sont généralement choisis de préférence aux sables calcaires, qui offrent cependant une bonne garantie quand leurs grains sont assez résistants.

Le dosage du mortier est une question importante au triple point de vue de la durée, de l'emploi et du prix de revient. D'autre part, il est certain que le volume de chaux employé doit être au moins égal à celui qui est formé par les vides du sable, sans quoi le massif ne serait pas imperméable, ce qui entraînerait une rapide désagrégation.

Il est d'usage de doser en volume le mortier de chaux, mais ce procédé n'est peut-être pas à l'abri de toute critique.

Le dosage varie suivant le degré de résistance que l'on désire obtenir.

Le tableau ci-dessous donne quelques formules de dosages de mortiers prises parmi celles qui sont le plus communément employées.

SABLE	AGGLOMÉRANT	NATURE de L'AGGLOMÉRANT	EMPLOIS DES MORTIERS
1^{m3}	250kg à 350kg	Chaux	
1	250	Ciment portland	
1	300	id.	Egouts de la ville de Paris. — Métropolitain.
1	350	Ciment de laitier	Egouts de la ville de Paris. — Métropolitain.
1	400-450-500	Ciment	Travaux à la mer, travaux en ciment armé, maçonneries exigeant une grande résistance.
1	600-650	id.	Enduits de réservoirs (gros sable).
1	1.000	id.	Chapes, dallages.
6 p.	1 p. ciment-1 p. chaux	Ciment et chaux	
10 p.	1 p. ciment-1,2 p. chaux	id.	Maçonnerie ordinaire.

Quant aux bétons, leur emploi se trouve tout indiqué dans la construction de murs de quai, de murs de soutènement, de fondations pour machines, de blocs artificiels, de digues, etc. La forme des pierres employées à leur confec-

tion importe fort peu, contrairement à ce que l'on serait tenté de croire.

Voici quelques dosages de bétons :

CIMENT	SABLE	CAILLOUX	EMPLOIS DES BÉTONS
1	2	4	Ouvrages de grande résistance.
1	3	5	Blocs artificiels, blocs en eau de mer.
1	4	6	
1	4	8	Ouvrages ordinaires d'importance moyenne.
1	5	10	
1	3 ou 4	3 ou 4	Port d'Aberdeen.
1	2	5 (galets)	— de Newhaven.
1	3	5 (galets)	— de Ymuiden.
2	3	5 (pierres cassées)	
1	2	6	— de Colombo.
200kg	0m3,45	0m3,90	— de Bilbao.

ANALYSE CHIMIQUE

Mortiers. — La façon de procéder est absolument la même que le mortier soit à base de chaux hydraulique ou qu'il soit à base de ciment. Pour éviter toute confusion dans les expressions, on ne parlera tout d'abord dans ce qui va suivre que du mortier de ciment. La chaux en question sera la chaux caustique CaO, et non le produit marchand connu sous le nom de *chaux*.

Avant tout, il est nécessaire de se procurer :

1° Une quantité de mortier assez considérable pour que l'échantillon choisi représente bien la moyenne de la partie intéressante de l'ouvrage ;

2° Un échantillon du ciment et un échantillon du sable ayant servi à la confection du mortier. Ces deux échantillons devront être fournis au même état physique qu'ils possédaient au moment de leur emploi. On prélèvera 1 ou 2 kilogrammes de chacune de ces matières.

Les matériaux ci-dessus seront soumis à l'analyse chimique, qui fournira les indications réunies dans le tableau suivant

dans lequel, dans un but de généralisation, des lettres ont été substituées aux chiffres :

DÉSIGNATION DES ÉLÉMENTS DOSÉS	COMPOSITION CENTÉSIMALE DU		
	MORTIER	CIMENT	SABLE
Silice soluble	a	a	»
Sable ou matières insolubles dans les acides	b	b' [1]	b''
Alumine	c	c'	c''
Oxyde ferrique	d	d'	d''
Chaux	e	e'	e''
Magnésie	f	f'	f''
Anhydride sulfurique	g	g'	g''
Perte au feu	h	h'	h''
Matières non dosées et pertes	j	j'	j''
TOTAUX	100	100	100

1. S'il y en a.

Les éléments indiqués dans ce tableau sont ceux qui entrent le plus généralement dans la composition de semblables produits. Leur analyse ne présente d'ailleurs aucune difficulté spéciale ; elle est analogue à celle qui a été indiquée au chapitre XIX : *Chaux et Ciments*.

La perte au feu du mortier ne comprend pas seulement, comme pour le ciment et pour le sable, l'eau hygrométrique, l'anhydride carbonique et les autres matières volatiles ou combustibles qui peuvent quelquefois s'y trouver ; elle est en outre composée d'eau introduite en cours de fabrication et dont la proportion est par suite inconnue. Pour comparer entre eux ces matériaux de composition chimique analogue, il est nécessaire de faire abstraction des éléments volatils qui viennent d'être indiqués et de ne considérer que les matières fixes, c'est-à-dire la silice soluble, le sable, l'alumine, l'oxyde ferrique, la chaux, la magnésie et l'anhydride sulfurique. Or, parmi ces derniers éléments, l'un des plus importants, la

chaux totale (e) contenue dans le mortier, ne provient évidemment que de la chaux chimique faisant partie du ciment et de la chaux existant dans le sable. Il en est de même de la somme des autres éléments fixes : $a+b+c+d+f+g$.

Si l'on élimine les matières volatiles et que l'on ramène ensuite à l'unité de volume les résultats précédents, le tableau peut se mettre sous la forme suivante :

COMPOSITION PAR UNITÉ DE VOLUME, DÉDUCTION FAITE DES MATIÈRES VOLATILES

	ÉLÉMENTS DOSÉS	
	Chaux (CaO)	Autres matières fixes
Mortier...	$\frac{e}{e+(a+b+c+d+f+g)}=C$	$\frac{a+b+c+d+f+g}{(a+b+c+d+f+g)+e}=M$
Ciment...	$\frac{e'}{e'+(a'+b'+c'+d'+f'+g')}=c_1$	$\frac{a'+b'+c'+d'+f'+g'}{(a'+b'+c'+d'+f'+g')+e'}=m_1$
Sable....	$\frac{e''}{e''+(b''+c''+d''+f''+g'')}=c_2$	$\frac{b''+c''+d''+f''+g''}{(b''+c''+d''+f''+g'')+e''}=m_2$

Or, en désignant par x et par y les proportions de ciment et de sable supposés calcinés entrant dans la composition de l'unité de volume de mortier, on a les relations :

$$\begin{aligned} c_1x + c_2y &= C, \\ m_1x + m_2y &= M, \\ x + y &= 1. \end{aligned}$$

Des équations précédentes on déduit aisément les valeurs des inconnues x et y :

$$x=\frac{C-c_2}{c_1-c_2}=\alpha,$$
$$y=\frac{C-c_1}{c_2-c_1}=\beta.$$

Les inconnues peuvent, comme on le voit, être également exprimées en fonction des matières fixes autres que la chaux au lieu de l'être en fonction de la chaux seule.

Les quantités calculées α et β de ciment et de sable entrant dans la composition de l'unité de volume du mortier sont ici données en volumes. Pour convertir en poids le volume trouvé de ciment, il suffit de déterminer expérimentalement pour celui-ci le poids spécifique p, ce qui est très facile. Le poids P du ciment correspondant au volume α est alors :

$$P = \alpha \times p.$$

Le mortier soumis à l'analyse est donc composé de P kilogrammes de ciment pour β mètres cubes de sable.

Si le sable est entièrement siliceux, c'est-à-dire s'il ne contient pas de chaux, les équations précédentes se simplifient puisque $c_2 = 0$; elles se réduisent à la formule suivante :

$$c_1 x = C,$$

d'où :

$$x = \frac{C}{c_1}.$$

Un raisonnement analogue s'applique à la détermination du dosage du mortier de chaux.

Un autre procédé applicable aux mortiers de chaux hydraulique ou de ciment consiste à doser la silice soluble. Cette silice provient, en effet, uniquement de la chaux ou du ciment, à l'exclusion, par conséquent, du sable dans lequel ce corps se trouve être insoluble. Un calcul très simple permet alors de déterminer la quantité de chaux ou de ciment entrant dans le mortier.

Bétons. — Dans ce cas, il convient de prendre un poids déterminé de béton, de le désagréger sans endommager d'une façon sensible les cailloux incorporés, puis de tamiser le tout à l'aide d'un crible dont les mailles sont de dimensions con-

venables; l'examen des matières permet de différencier, de façon suffisamment exacte, les cailloux et le sable et de faire choix d'un tamis approprié. Lorsque cette séparation est opérée, on recueille les cailloux, on les débarrasse du mortier adhérent par un brassage sous l'eau suivi d'un lavage ; on les dessèche et on les pèse. On a ainsi le poids des pierres cassées et par suite celui du mortier entrant dans la composition du béton.

On prend ensuite une portion du mortier provenant du tamisage ; on le soumet à l'analyse comme il a été dit à propos du mortier.

On a de cette façon la composition en poids du béton. Quant au mortier qui est entré dans la confection de ce béton, sa composition est obtenue, comme on l'a vu, en volumes de ciment et en poids de sable.

Il y aurait, certes, grand intérêt à connaître le dosage du béton en volumes, mais il existe de telles variations de poids entre les différentes parties d'un ouvrage, suivant la plus ou moins grande quantité de pierres incorporées ou la grosseur de ces pierres, qu'il est prudent de ne pas pousser plus avant les recherches analytiques.

S'il y avait utilité à comparer entre eux divers endroits d'un même ouvrage, soit parce qu'ils se sont comportés différemment, soit pour toute autre raison, on ferait autant d'analyses de mortiers ou de bétons qu'on le jugerait nécessaire.

ESSAIS

La Commission des méthodes d'essai s'est arrêtée aux prescriptions suivantes en ce qui concerne les pierres artificielles.

Les méthodes d'essai des pierres naturelles peuvent s'appliquer aux pierres artificielles.

Les échantillons prélevés dans du béton ou du mortier en service sont autant que possible accompagnés d'une note indiquant :

1° La nature du ciment employé ;

2° La nature du sable et sa composition granulométrique ;
3° La nature du gravier ;
4° Le dosage de ces différents matériaux ;
5° La nature de l'eau de gâchage ;
6° La destination des blocs artificiels ;
7° Leur âge.

L'ensemble de ces renseignements permet, en multipliant les essais de ce genre, de se rendre compte de la façon dont ces différents produits se comportent dans chaque milieu et de leur résistance aux divers agents de destruction.

Pour donner des indications utiles, les essais d'étanchéité pratiqués sur tuyaux de conduite en béton doivent être poursuivis pendant un mois au moins.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'analyse chimique peut être un moyen d'investigation qui mérite d'être pris en considération lorsque des doutes s'élèvent sur la manière dont certaines maçonneries ont été exécutées. Elle peut être utile en cas de malfaçon ou d'inobservation dans les dosages prescrits par les devis, si l'on possède toutefois les types de sable, chaux, ciment et cailloux qui ont été employés et sans lesquels l'analyse ne signifierait rien.

Quant aux essais, il faut pouvoir disposer de blocs de mortiers ou de bétons de dimensions suffisantes, car on ne peut tirer que des conclusions souvent erronées d'expériences faites sur des cubes de $0^m,10$ à $0^m,30$ de côté. En effet, si l'essai porte sur un échantillon renfermant de gros éléments de sable ou de cailloux, on obtient des résistances différentes de celles que fournit un échantillon composé de petits éléments. Mais, pour des blocs volumineux, il est indispensable de recourir à un laboratoire possédant des appareils puissants, parce que la résistance devient considérable.

L'essai de flexion (pas plus que celui de traction) ne donne de renseignements absolus, car la composition de la surface du prisme expérimenté n'est pas toujours identique à celle du milieu de la masse.

M. Féret, qui s'est beaucoup occupé de la question des mor-

tiers et des bétons, conclut de ses expériences personnelles que :

1° A dosage égal, la composition de la pierraille influe peu sur la compacité du béton tant qu'on ne change pas la dimension de ses plus gros éléments et ladite compacité augmente en même temps que cette dimension;

2° La compacité du béton varie en raison inverse de la teneur du mortier en ciment et en grains fins de sable ;

3° Pour la plus grande majorité des bétons réellement pratiques, la compacité décroît quand on augmente la proportion du mortier combiné à une même quantité de pierres.

La résistance à la rupture par traction des mortiers ne paraît avoir aucun rapport avec la résistance à la rupture par compression.

La grosseur du sable et la nature des agglomérants ont une certaine influence sur le rendement des mortiers, mais cette influence n'est pas tellement considérable qu'il y ait lieu de s'en préoccuper dans la pratique courante.

On peut dire que, toutes choses égales d'ailleurs, les résistances des mortiers de diverses compositions dépendent non seulement du poids du liant entrant dans 1 litre de mortier, mais aussi de la contexture de ce dernier. M. Durand-Claye a trouvé que dans les essais de traction le mode de suspension des éprouvettes dans les griffes des appareils d'essai a une influence sur les résultats observés, et que l'effort inégalement réparti dans la section de rupture est plus considérable sur les rives que vers le centre. De plus, la rupture se produit assez souvent en dehors de la section minima de l'éprouvette.

Les essais de compression et de flexion ne conduisent pas davantage à des résultats probants.

Dans ces conditions, il convient de se montrer circonspect dans les résultats à tirer des essais effectués sur ces matériaux artificiels.

CHAPITRE XXII

ARGILES. — BRIQUES ET TUILES

I. — ARGILES

Les argiles, comme on le sait, sont des silicates d'aluminium hydratés, de composition et d'origine variables, de consistance onctueuse, se délayant plus ou moins facilement dans l'eau en formant une pâte. Elles jouissent de la propriété de durcir sous l'action de la chaleur, de happer à la langue et de dégager par l'expiration une odeur spéciale, appelée *odeur argileuse*.

Elles proviennent, le plus souvent, de la décomposition de roches feldspathiques [1] sous l'influence d'agents extérieurs, tels que l'eau et l'anhydride carbonique.

Lorsque les eaux n'ont entraîné que des débris de ces roches, elles n'ont pu former par leurs dépôts que des amas d'argile pure ou argile *plastique*. Mais si, dans leur parcours, ces eaux ont traversé des terrains sableux, calcaires, ferrugineux ou des limons de diverses natures, elles se sont imprégnées d'une quantité plus ou moins forte de matières étrangères et les dépôts formés constituent les argiles sableuses, calcarifères, ferrugineuses et tourbeuses.

Les argiles abondent surtout dans les terrains secondaires, principalement dans le lias, l'oxfordien et le portlandien. On les rencontre aussi dans les terrains tertiaires.

1. Le feldspath est un silicate double d'aluminium et de potassium dont la formule est : $K^2O,Al^2O^3,6SiO^2$.

Elles présentent des colorations diverses, variant du blanc ou du jaune au gris noirâtre. Ces colorations sont dues très souvent à l'oxyde de fer. Suivant que cet oxyde ferrique se présente à l'état anhydre ou hydraté, les argiles sont colorées en rouge ou en jaune ocreux. Les argiles ne contenant pas d'oxyde de fer et ne se colorant pas au feu sont très rares.

Les propriétés des argiles dépendent beaucoup du degré d'intimité de leurs éléments avec le sable quartzeux, l'oxyde de fer hydraté, la dolomie, le carbonate de calcium, les matières bitumineuses, les pyrites de fer, etc.

D'autres causes, parmi lesquelles il faut citer la plasticité et la composition chimique, influent aussi sur les qualités recherchées.

En général, les argiles contiennent :

Silice	45 à 80 0/0
Alumine	15 à 40 0/0

et de l'eau en quantité très variable, mais rarement supérieure à 18 0/0.

L'*argile plastique*, à l'état naturel et non desséchée, est très onctueuse sous l'ongle ; elle forme avec l'eau une pâte liante susceptible d'être façonnée. Au point de vue chimique, on la reconnaît à ce que la proportion d'eau combinée qu'elle contient est comprise entre 10 et 14 0/0, la quantité de silice variant de 48 à 65 0/0.

Elle contient peu de matières étrangères. La pâte qu'elle forme avec l'eau se dessèche très lentement en subissant une forte contraction désignée sous le nom de *retrait*.

Comme argiles plastiques, on peut citer celles de Forges-les-Eaux, de Dreux, de Montereau.

Dans une atmosphère saturée d'humidité, l'argile pure absorbe une quantité d'eau variant de 3 à 9 0/0 de son poids, suivant l'état hygrométrique et les dimensions de ses grains.

Si une semblable argile est soumise à l'action de la chaleur, on constate que, vers 110 à 120°, il y a élimination complète de l'eau hygrométrique. Si l'on élève la température, il se produit, vers 350 à 400°, un commencement de décomposition.

Cette décomposition, qui se poursuit à plus haute température, devient complète vers 700°. L'eau est éliminée et il reste un mélange de silice et d'alumine. La plasticité de l'argile est alors détruite. De 700 à 800°, la silice commence à réagir sur l'alumine. Vers 1.200°, la réaction est terminée ; on se trouve en présence d'un silicate d'aluminium anhydre. Enfin, vers 1.500°, il y a ramollissement, puis fusion de la masse.

Les acides dilués n'ont pas d'action sur l'argile pure, surtout à la température ordinaire ; mais les acides concentrés déplacent la silice vers 300°.

Le *kaolin* a pour formule : $Al^2O^3,2SiO^2,2H^2O$.

C'est donc un bisilicate d'aluminium hydraté ; on le désigne en minéralogie sous le nom de *kaolinite*.

Ce corps contient généralement 46 0/0 de silice et 14 0/0 d'eau. C'est une substance blanche, onctueuse, plastique, que l'on trouve sous forme d'amas irréguliers au milieu de roches primitives comme les granites et les gneiss.

L'*argile smectique* ou *terre à foulon* se présente sous l'aspect opaque, de couleur gris verdâtre. Elle happe très peu à la langue et sert pour le dégraissage et pour le foulage des draps. Sa composition chimique est de 45 à 50 0/0 de silice, de 18 à 25 0/0 d'alumine et de 21 à 35 0/0 d'eau. Elle est plus impure que l'argile plastique et fond à une température plus élevée. Elle est entièrement attaquée par les acides. En France, on rencontre cette nature d'argile à Issoudun, à Villeneuve.

L'*argile figuline* possède une grande fusibilité due à la chaux et à l'oxyde de fer qu'elle renferme ; elle forme avec l'eau une pâte peu liante. Son principal usage consiste dans la fabrication des terres cuites, des poteries grossières, dans le garnissage des fonds de bassins ; c'est la *terre glaise* des sculpteurs.

L'*argile calcarifère* ou *argile calcaire* contient du carbonate de calcium. Elle est encore assez plastique. Si la proportion de carbonate de calcium dépasse 50 0/0, on a un calcaire argileux.

La *marne* est une argile dont l'emploi est fréquent en agriculture. Elle sert pour l'amendement des terres. Elle

contient souvent des matières organiques qui la colorent.

L'*argile sableuse* ou *limon* est formée d'un mélange d'argile et de grains très fins de sable quartzeux.

L'*argile bitumineuse* contient une proportion de bitume pouvant dépasser le tiers de son poids. Elle sert à la fabrication de creusets destinés à la fusion de l'acier. Les substances organiques lui communiquent une coloration brune, grise ou noire. Elle exhale, par le frottement ou par la cuisson, une odeur bitumineuse.

Enfin une autre variété d'argile est l'argile *schisteuse* qui abonde dans le terrain houiller. De texture grossière, elle a un éclat terne; elle est fusible, se délaye difficilement dans l'eau, contient du quartz, un peu de feldspath et du mica.

ANALYSE CHIMIQUE

Par l'analyse on se propose de constater la présence ou l'absence d'un ou de plusieurs corps utiles ou nuisibles; il faut employer dans ce cas l'analyse qualitative. Ou bien on veut doser les corps contenus et révélés par le mode précédent; on a recours alors à l'analyse quantitative.

ANALYSE QUALITATIVE

L'argile à analyser est soumise aux actions successives de l'eau bouillante et de l'acide chlorhydrique étendu.

Action de l'eau. — Deux grammes d'argile en poudre fine sont versés dans 100 centimètres cubes d'eau. On porte à l'ébullition; on filtre. Dans la liqueur filtrée, on recherche :

1° Les chlorures, par l'azotate d'argent en présence de l'acide azotique ; on a un précipité blanc de chlorure d'argent;

2° Les sulfates, à l'aide du chlorure de baryum en présence de l'acide chlorhydrique; on a un précipité blanc de sulfate de baryum;

3° Le sodium, par la coloration jaune communiquée à la flamme d'un bec Bunsen ou d'une lampe à alcool;

4° L'ammoniaque, par le réactif de Neissler;

5° Le calcium, par l'oxalate d'ammonium; il se forme un précipité blanc d'oxalate de calcium;

6° Le fer, par le ferrocyanure de potassium ou le ferricyanure de potassium suivant que le fer est au maximum ou au minimum. Dans le premier cas, on a un précipité bleu de Prusse; dans le second cas, le précipité est bleu de Turnbull.

Action de l'acide chlorhydrique. — Deux grammes d'argile en poudre très fine sont mis à digérer pendant deux heures avec de l'acide chlorhydrique étendu. On filtre et on fait bouillir la liqueur avec quelques centimètres cubes d'acide azotique pour faire passer le fer au maximum. Dans la solution, on recherche :

1° Le fer, par le ferrocyanure de potassium;

2° La chaux, par l'oxalate d'ammonium en présence du chlorure d'ammonium;

3° La magnésie, par le phosphate de sodium et l'ammoniaque après élimination de la chaux;

4° L'acide phosphorique, par évaporation à sec de la solution chlorhydrique d'argile, reprise du résidu par l'eau et l'acide azotique, et précipitation par le molybdate d'ammonium;

5° La silice, par évaporation à sec de la liqueur chlorhydrique suivie d'une calcination. La silice reste insoluble lorsqu'on la reprend par l'eau et l'acide chlorhydrique.

ANALYSE QUANTITATIVE

Les dosages effectués au moyen de cette analyse sont les suivants :

Eau hygrométrique. — Cinq grammes d'argile sont laissés, pendant deux heures, à l'étuve, à la température de 110°. La différence de poids représente l'eau hygrométrique.

Un autre procédé, plus rigoureux, consiste à dessécher l'argile sous une cloche dans laquelle on fait le vide au moyen de la machine pneumatique.

Perte au feu. — Trois grammes de matière sont placés dans un creuset de platine et portés au rouge vif pendant dix minutes. La différence de poids observée constitue la perte au feu, comprenant l'eau hygrométrique, l'eau combinée, les matières charbonneuses et bitumineuses.

Anhydride carbonique. — On emploie, à cet effet, des appareils construits pour cet usage et souvent utilisés dans les analyses de calcaires[1]. Ces instruments sont basés sur le dégagement de l'anhydride carbonique au moyen de l'acide chlorhydrique, par exemple.

Sable quartzeux. — On opère la lévigation sur 200 grammes de matière, comme il a été dit. Le sable plus ou moins grossier obtenu peut être mélangé de quelques grains de carbonate de calcium ou de dolomie. Dans ce cas, il convient de reprendre le résidu, que l'on met en contact prolongé avec l'acide chlorhydrique étendu; puis, après lavage, on reprend ce nouveau résidu que l'on considère comme étant du sable quartzeux.

Une méthode analytique plus exacte, à laquelle il est fait allusion dans l'essai de texture, est la suivante:

L'argile, en poudre fine, est attaquée dans un creuset de porcelaine par l'acide sulfurique dilué à la température de 100°. On dissout ainsi les carbonates de calcium et de magnésium, les hydrates d'oxyde de fer, etc., que l'on peut d'ailleurs doser séparément. On obtient ainsi un résidu composé de silicates et de quartz. Ce résidu est ensuite soumis, pendant quinze à vingt heures à la température de 300°, à l'action de l'acide sulfurique concentré. Les hydrosilicates d'aluminium et le mica pulvérulent se sont dissous.

Le résidu obtenu, formé de quartz, de mica grossier et de feldspath, est soumis à un lavage qui a pour but d'éliminer les petites quantités de mica qui demeurent assez longtemps en suspension. On obtient alors une matière composée presque entièrement de quartz.

1. Voir chap. XIII: *Pierres naturelles; calcaires.*

Silice. — Deux grammes d'argile séchée à 120° sont mélangés avec 10 grammes de carbonate de sodium dans un creuset de platine que l'on chauffe progressivement, de manière à obtenir la fusion tranquille du mélange. Lorsque la réaction paraît terminée, on refroidit brusquement le creuset en le plaçant sur une surface froide ou dans l'eau, ce qui facilite ultérieurement le détachement du culot qui se forme par le refroidissement. On reprend ce culot par l'eau et par l'acide chlorhydrique dans une capsule en porcelaine ; on évapore à sec. On fait une seconde reprise à l'eau chaude acidulée. Le résidu filtré est desséché, calciné et pesé : c'est la silice.

Alumine et oxyde ferrique. — La liqueur filtrée, provenant de l'opération précédente, est portée à l'ébullition. On ajoute de l'ammoniaque avec précaution et en quantité suffisante pour précipiter les deux oxydes. On recueille le précipité sur un filtre et, comme à l'ordinaire, on dessèche, on calcine et on pèse ce précipité formé de la réunion de l'alumine et de l'oxyde ferrique.

Chaux. — Dans le liquide filtré précédent, on verse de l'oxalate d'ammonium. L'oxalate de calcium précipité est filtré, desséché, calciné au rouge vif et pesé. On obtient ainsi la chaux caustique.

Magnésie. — Enfin la solution restante est additionnée de phosphate de sodium, puis d'ammoniaque, ce qui donne lieu, au bout de douze heures, à la formation d'un précipité de phosphate ammoniaco-magnésien qui, par la calcination, produit du pyrophosphate de magnésium, $P^2O^7Mg^2$. Le poids de ce dernier composé, multiplié par 0,360, donne celui de la magnésie.

Alumine seule. Oxyde ferrique seul. — Il importe souvent de connaître les teneurs propres d'alumine et d'oxyde ferrique, ces éléments jouant, comme on l'a vu, un rôle important dans les argiles. Le procédé indiqué au chapitre XIII (*Pierres naturelles; calcaires*) convient également ici.

Les dosages qui viennent d'être décrits sont généralement suffisants en ce qui concerne les argiles. Mais, si l'on examine un kaolin, ces renseignements doivent être complétés par la détermination des alcalis. On procède alors de la façon suivante :

Alcalis (potasse et soude). — L'argile, en poudre fine, est mélangée dans un creuset de platine avec du fluorure d'ammonium et chauffée un certain temps. Il se dégage du fluorure de silicium, on ajoute ensuite de l'acide sulfurique. On évapore à sec, on porte le creuset au rouge vif, on reprend par l'eau chaude et on filtre. Toutes les bases sont à l'état de sulfates. Dans la liqueur filtrée, l'addition d'eau de baryte et le passage d'un courant de gaz carbonique déterminent la précipitation des bases à l'état de carbonates; on a aussi du sulfate de baryum insoluble. On filtre. Dans la solution on verse du carbonate d'ammonium, on filtre à nouveau. On évapore à sec et on calcine légèrement pour volatiliser les sels ammoniacaux. Après une nouvelle évaporation, suivie d'une légère calcination, on pèse les alcalis à l'état de carbonates. On transforme quelquefois ces carbonates en sulfates alcalins par addition d'acide sulfurique suivie d'une évaporation, puis en sulfate de baryum en ajoutant du chlorure de baryum.

On peut aussi doser le potassium séparément, en le précipitant par le tétrachlorure de platine dans un mélange de chlorures alcalins.

Le tableau suivant donne, à titre d'exemples, quelques analyses d'argiles :

DÉSIGNATION DES ARGILES	SILICE	ALUMINE	OXYDE FERRIQUE	CHAUX	MAGNÉSIE	ALCALIS	PERTE AU FEU
Kaolin de St-Yrieix (Hte-Vienne).	48,75	35,20	»	»	»	2,40	12,52
— du Var	55,80	31,20	1,80	»	0,50	3,20	7,20
Argile pure de Forges-les-Eaux .	65,00	24,00	»	»	»	»	11,00
— de Mussidan (Dordogne)..	49,10	37,60	0,30	0,30	traces	0,15	12,30
— de Vaugirard (Seine).....	51,85	26,00	4,95	2,33	traces	»	14,52
— smectique de Silésie.....	49,60	18,35	5,00	»	1,75	»	25,05
— réfractaire d'Argenton (Indre).	48,40	30,00	2,20	»	»	traces	18,00

L'argile pure, ne contenant que de faibles quantités de matières charbonneuses ou bitumineuses, convient à la fabrication de briques réfractaires. On s'en sert aussi pour confectionner des moufles, des creusets, de la faïence fine.

Le kaolin sert à la fabrication des objets en porcelaine.

Si l'argile renferme une trop grande quantité d'oxyde de fer, de carbonate de calcium, de dolomie, elle est impropre à la confection de matériaux réfractaires, mais elle convient à la fabrication de briques ordinaires, tuiles, carreaux, poteries, faïences communes.

Si l'argile contient une assez forte proportion de carbonate de calcium, plus de 12 0/0 par exemple, elle constitue, suivant les cas, les marnes, les calcaires à chaux et à ciment.

L'argile entre dans la composition des terres employées en agriculture. Si elle prédomine, elle forme les *terres fortes*. Si elle retient une grande quantité d'eau (et elle peut en absorber jusqu'à 70 0/0), elle rend le sol humide et forme les *terres froides*. Il est admis qu'une terre possède toutes les propriétés agricoles si elle contient :

Sable	50 à 75 0/0
Argile	20 à 30 0/0
Calcaire assimilable	5 à 10 0/0
Humus ou matières organiques	5 à 10 0/0

Un mélange intime de 2 parties de graphite et de 1 partie d'argile sert à la confection de creusets réfractaires connus sous le nom de *creusets de plombagine*.

A l'état naturel, l'argile est peu employée dans les constructions. Cependant, dans certaines localités du Midi, on emploie le *pisé*. En Champagne et dans une partie du Midi, les briques crues, aussi appelées *carreaux de terre*, trouvent également leur application. Dans la région champenoise, surtout dans les faubourgs de Reims ainsi que dans beaucoup de villages de la Marne, on voit des maisons entières, avec dépendances, construites en carreaux de terre recouverts d'un crépi. Les soubassements seuls sont formés de maçonnerie ordinaire ou même simplement de carreaux ou moellons en craie.

Les batardeaux, corrois, revêtements, colmatages, etc., nécessitent plus ou moins l'emploi de l'argile.

On connaît aussi les ennuis que procurent les amas considérables d'argile par les glissements qui en sont la conséquence.

Enfin, les ocres sont des argiles utilisées en peinture et dont la proportion d'oxyde ferrique peut dépasser 40 0/0.

ESSAIS

Les essais sont au nombre de quatre : essai de texture, essai de plasticité, essai de fusibilité, essai pyrométrique.

Essai de texture. — De prime abord, on est tenté de croire que le microscope peut servir à la détermination de la constitution intime des argiles. Il n'en est malheureusement rien et les recherches faites dans ce sens n'ont pas donné de résultats pratiques.

La séparation des grains de différentes grosseurs au moyen du tamisage ne peut pas non plus donner d'indications satisfaisantes en raison de l'extrême ténuité des particules d'hydrosilicate d'aluminium.

Dans ces conditions, c'est à la *lévigation* que l'on a recours.

La manière de procéder la plus simple consiste à agiter énergiquement de l'argile délayée dans de l'eau contenue dans une éprouvette graduée, puis de laisser déposer les grains. Les plus gros grains se déposent très rapidement, tandis que les grains les plus fins se déposent au bout de quelques heures, ou même de quelques jours. En lisant les divisions auxquelles s'arrête chaque grosseur de grains dans l'éprouvette, on arrive à se faire une idée approximative de la composition granulométrique de l'argile.

Seulement, ce procédé est forcément entaché d'une double cause d'erreur : l'une due à l'appréciation différente de la grosseur suivant chaque expérimentateur, l'autre provenant de ce que des parties très fines d'argile comprises dans la

partie inférieure de l'éprouvette se trouvent emprisonnées au milieu de grains plus gros.

Les procédés suivants, plus longs, mais aussi plus exacts que le précédent, sont basés sur la vitesse plus ou moins grande avec laquelle des particules en suspension dans l'eau tombent au fond du vase dans lequel on opère.

Divers appareils servent à cette détermination. Il suffira de décrire les deux dispositifs les plus employés.

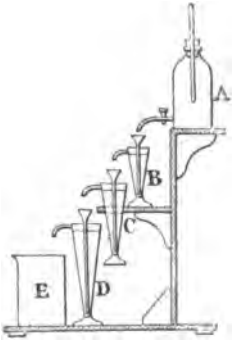

Fig. 107. — Appareil Schulze.

L'appareil imaginé par M. Schulze est représenté par la figure 107. Il comprend un réservoir A qui laisse écouler un courant d'eau réglable à volonté et tombant dans une série de verres coniques B, C, D munis d'une tubulure latérale et fermés à leur partie supérieure par des disques métalliques à travers lesquels pénètrent les tubes à entonnoir descendant au fond des vases. Ces verres sont de dimensions et de capacités différentes.

L'argile à essayer, réduite en poudre, est versée dans le premier vase B où la vitesse de l'eau est maxima. Le vase C retient des particules moins grosses entraînées par l'eau. Dans le vase D se déposent des grains encore plus fins en raison de la moindre vitesse de l'eau. Enfin, un récipient E, d'assez grande capacité, recueille les parties les plus fines d'argile.

On a ainsi une série de résidus de finesse croissante contenus dans les vases. On les fait sécher et on en détermine le poids.

Un autre appareil, basé également sur la vitesse de l'eau, est dû à M. Schöne. Il se compose (*fig.* 108) d'un tube conique AF de $0^{m},60$ de hauteur, dont la partie la plus large D a 5 centimètres de diamètre. Les tubes FC et AL mesurent 5 millimètres seulement de largeur. L'argile, passée à travers un tamis dont les mailles sont espacées de $0^{mm},2$, puis délayée dans l'eau, est introduite dans le tube AF par l'ouver-

ture A. On remplit le tube avec de l'eau jusqu'à ce que le niveau atteigne le trait marqué E. On fait alors passer un courant d'eau dans le sens indiqué par la flèche. Cette eau sort par l'ouverture J. La vitesse de ce courant est mesurée par la hauteur de l'eau dans le tube JL dont la longueur est supérieure à 1 mètre. En réglant la vitesse de l'eau de façon convenable, de manière que le niveau ne dépasse pas 18 millimètres, le courant entraîne les grains d'un diamètre inférieur à un dixième de millimètre, que l'on recueille dans un vase M. Lorsque l'eau sort limpide, on augmente la vitesse du courant ; on reçoit les grains dans un autre vase, et ainsi de suite, en donnant, en dernier lieu, la vitesse maxima. Les parties restant dans le tube AF ont alors plus de 4 dixièmes de millimètre. On sèche les divers résidus obtenus que l'on pèse.

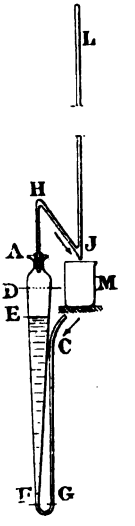

Fig. 108.
Appareil Schöne.

Seger classe les grains dans l'ordre suivant, d'après leur grosseur :

Grains de moins de 0mm,010	Argile ;
Grains de 0mm,010 à 0mm,025	Grains présentant encore un peu de plasticité ; masse se désagrégeant à la dessiccation :
Grains de 0mm,025 à 0mm,040	Grains insensibles au toucher, mais n'ayant plus de plasticité ;
Grains de 0mm,040 à 0mm,333	Sable fin ;
Grains de 0mm,333 et au-dessus	Sable grossier.

Les méthodes précédentes permettent donc de faire un classement suivant la grosseur des grains.

Mais il faut avouer que cette détermination de parties fines inférieures à 1 centième de millimètre, comme représentant l'argile, est bien arbitraire. Elle ne repose, en tout cas, sur aucune donnée scientifique.

Aussi paraît-il utile de compléter cet essai mécanique par un essai chimique, indiqué plus loin, qui permet de doser exactement la quantité de quartz.

Essai de plasticité. — On sait que si, à une argile sèche pulvérulente, on ajoute peu à peu de l'eau, on obtient une pâte devenant de plus en plus plastique. Il arrive un moment où la quantité d'eau ajoutée donne un maximum de plasticité. Cette propriété diminue si le liquide est en excès ; elle varie, d'ailleurs, suivant les argiles.

Des recherches micrographiques, relatives à la composition des argiles, ont eu pour résultat de faire connaître que leur plasticité était due, non seulement à l'extrême finesse des grains qui les composent, mais encore à la forme lamellaire de ces grains. On constate, en effet, qu'à l'état sec l'argile se compose de cristaux lamellaires dirigés en tous sens. Par suite d'addition d'eau, ces lamelles s'orientent dans des directions parallèles et, subissant l'attraction moléculaire, se rapprochent au point d'arriver à une juxtaposition. Ce groupement moléculaire est encore facilité par le pétrissage manuel ou mécanique de la pâte.

On conçoit alors facilement qu'en ajoutant un excès d'eau il y ait éloignement des cristaux dont la cohésion est ainsi détruite, et par suite diminution de la plasticité.

Il a, de plus, été reconnu que l'incorporation de certains liquides autres que l'eau a pour effet d'augmenter la plasticité ; ce fait se constate avec les huiles et les liquides gras.

D'autres liquides ont un effet contraire. Ainsi l'alcool, l'essence de térébenthine, l'éther diminuent la plasticité.

Enfin la glycérine enlève totalement cette qualité et laisse l'argile pulvérulente.

Les argiles qui contiennent le plus d'alumine et qui renferment le plus d'eau sont celles qui possèdent au plus haut degré cette propriété. Mais la combinaison de deux éléments seulement entre eux (silice et alumine, silice et eau, eau et alumine) n'est pas susceptible de donner une matière liante.

La plasticité d'une argile est due à la dimension, à la forme, à la nature des matières qui la composent, ainsi qu'à la proportion d'hydrosilicate qu'elle contient par rapport aux autres corps.

Des observations qui précèdent, il résulte qu'il y a une certaine difficulté à effectuer un essai rationnel de plasti-

cité. Aussi n'est-il pas étonnant que l'essai mécanique le plus usité, en pareil cas, soit encore le pétrissage à la main. C'est ce moyen, en effet, qui, avec un peu d'habitude, conduit au meilleur résultat.

Cependant, à titre d'indication complémentaire, il est bon, quand on le peut, d'employer le procédé suivant, imaginé par M. Bischoff.

Cinq cents grammes d'argile pulvérisée et séchée à 120° sont divisés en plusieurs portions d'un poids uniforme de 50 grammes. Du sable quartzeux fin et sec est ajouté en proportion croissante à chaque lot d'argile. On additionne d'eau et on malaxe le mieux possible chacune de ces portions, avec lesquelles on confectionne une série de boulettes différentes contenant chacune un dixième de son poids de sable de plus que la précédente. Ces boulettes sont ensuite séchées. Après complète calcination, on les frotte contre le pouce de la main en opérant au-dessus d'une feuille de papier. On constate si ce frottement occasionne une désagrégation de la pâte. Si les additions successivement croissantes de sable, ont été faites de manière convenable, on a des boulettes qui restent intactes ; d'autres se désagrègent complètement, d'autres enfin laissent échapper quelques grains seulement. Les premières boulettes ont été confectionnées avec peu de sable, les deuxièmes avec trop de sable les troisièmes avec une quantité de sable qui ne doit pas être dépassée. Cette dernière quantité mesure la plasticité.

Il va sans dire que l'on doit employer, dans ce cas, un sable normal.

Le poids de sable ajouté sans avoir de désagrégation varie de zéro à trois fois le poids de l'argile. Si une argile absorbe deux fois et demie son poids de sable, sa plasticité est représentée par le nombre 2,5.

Par analogie avec les essais de ciment, on a cherché à faire des essais de rupture sur des briquettes d'argile mélangée à du sable. Mais les résultats obtenus n'ont pas paru concluants et on a abandonné ce mode d'essai.

Essai de fusibilité. — Chimiquement pure, l'argile est un corps réfractaire ; mais la présence de matières étrangères

lui fait perdre cette propriété dès que la proportion dépasse 3 à 8 0/0. La chaux et l'oxyde de fer, notamment, ont pour effet d'augmenter la fusibilité.

Pour les matériaux réfractaires, il y a un grand intérêt à recourir à cet essai, afin de connaître la manière dont ils se comporteront sous l'influence d'une température élevée. On se sert à cet effet de fours spéciaux (fours Perrot, Wiessnegg, Leclercq et Forquignon).

Cet essai, étant de peu d'importance pour les matériaux de construction ordinaires, ne sera pas décrit.

Essai pyrométrique. — Un essai analogue au précédent, l'essai pyrométrique dû à Seger, sert à déterminer le degré de résistance au feu. L'argile à essayer est façonnée en pyramide triangulaire de 15 millimètres de côté à la base et de 50 millimètres de hauteur. Des types de mêmes dimensions, que l'on trouve dans le commerce et dont on connaît la façon de se comporter, sont placés, avec l'échantillon, dans un creuset que l'on soumet à une température élevée dans un four spécial. L'échantillon et les types éprouvent une défor-

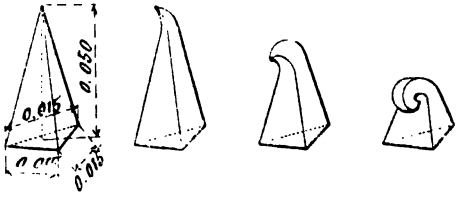

Fig. 109. — Montres Seger.

mation sous l'action de la chaleur (*fig.* 109). Ils subissent une contraction ; leur sommet s'affaisse. Une fois l'opération terminée, il est facile, par la comparaison avec les types différents mis en expérience, d'intercaler l'échantillon entre deux de ceux-ci. On obtient de cette façon une indication très utile sur la valeur des matériaux réfractaires.

II. — BRIQUES ET TUILES

1° BRIQUES

Les briques sont des matériaux artificiels formés essentiellement d'argile.

Il en existe de nombreuses variétés. Les unes sont employées à l'état naturel : ce sont les briques crues ; les autres ne sont utilisées qu'après cuisson : ce sont les briques ordinaires.

Briques crues. — Elles s'emploient dans quelques régions de la France, mais surtout, comme il vient d'être dit à propos des argiles, dans le Midi et dans une partie de la Champagne. Elles se fabriquent tantôt avec de l'argile rouge et blanche mélangée à du sable ou à des débris de foin ou de paille, tantôt avec la boue des routes composée le plus souvent d'argile, de craie et de silex écrasé.

On recueille la boue des chemins ; on y ajoute de l'eau en quantité suffisante. On triture le mélange de façon à en faire une pâte que l'on débarrasse des pierrailles et des matières étrangères. Lorsque le malaxage est complet et que l'on commence à percevoir une odeur nauséabonde due à la fermentation, on procède au moulage, qui consiste à introduire dans une caisse prismatique en bois une quantité de pâte suffisante ; on en dame la surface. On démoule successivement les briques ainsi formées et on les dispose en haies en réservant des vides qui facilitent la circulation de l'air, ce qui active la dessiccation. La rangée supérieure de chaque haie est recouverte de paillassons qui protègent les briques de l'action intensive du soleil ou de la pluie. Le moment le plus favorable pour la fabrication est le printemps ou l'automne. Les dimensions le plus communément adoptées sont les suivantes : $0^m,30 \times 0^m,14 \times 0^m,07$.

Briques cuites. — Elles sont composées d'argile que l'on soumet à une cuisson convenable.

Le choix de l'argile exerce une grande influence sur la qualité du produit.

L'argile plastique cuite sans addition d'autre matière ne convient pas à la fabrication. La brique obtenue se déforme et se fendille. Il est nécessaire de lui ajouter du sable qui modère le retrait et qui agit comme substance dégraissante.

La brique de Bourgogne, d'un usage si répandu, résulte d'un mélange d'argile peu ferrugineuse et d'un sable non calcaire; ce mélange est porté à une haute température. Le produit obtenu est dur et convient au revêtement intérieur des hauts fourneaux.

La terre végétale jaunâtre formée d'argile, de calcaire et de sable sert assez souvent à une fabrication de peu d'importance, mais la plupart du temps les produits cuits sont friables, poreux, de peu de durée et assez fusibles. Cependant une terre argileuse à laquelle on fait des additions convenables de sable donne des produits courants acceptables.

En général, on peut dire qu'une terre convient à la fabrication de briques quand elle n'est ni trop argileuse ni trop sablonneuse. Une proportion trop forte en argile donne une pâte sujette à la déformation et au fendillement. Une quantité trop considérable de sable fournit un produit poreux, friable et sans consistance. Il s'ensuit qu'à une terre trop maigre il faut ajouter de l'argile ou une terre grasse et qu'une terre trop grasse doit être additionnée de sable ou d'une substance sablonneuse. Dans le cas où des conditions économiques empêchent de se procurer à un prix raisonnable l'argile plastique nécessaire, on peut recourir au calcaire ou à la marne, qui communiquent à la pâte une certaine fusibilité.

Si l'on se sert d'argile, il faut rechercher celle qui est rude au toucher, qui happe à la langue et qui est exempte de matières salines et de parties terreuses étrangères. Cette argile ne doit pas contenir de particules métalliques, de débris végétaux ou animaux, ni renfermer de cailloux trop volumineux ou trop nombreux. D'ailleurs, pour savoir d'une façon certaine si une terre est propre à la fabrication, rien ne renseigne autant qu'un essai direct de cuisson. Pour faire cette expérience, on mélange la terre avec de l'eau de façon à

former une pâte avec laquelle on confectionne quelques briquettes que l'on fait sécher lentement, puis que l'on cuit dans un four de potier. L'examen après cuisson donne une indication sur la modification qui doit être apportée au dosage. On conçoit l'intérêt que présente un semblable essai quand on se trouve dans un pays dépourvu de briqueteries.

L'indéformabilité, la compacité, la dureté, la résistance, la ténacité des produits obtenus sont également autant de propriétés dont la connaissance est à peu près indispensable.

La pâte destinée à un pétrissage mécanique doit être faite avec la terre de la carrière que l'on humecte légèrement. Elle est bonne quand elle conserve l'empreinte des doigts et qu'elle n'adhère pas après eux quand elle est pétrie à la main. Le malaxage joue un grand rôle, car, bien exécuté, il améliore une terre de médiocre qualité.

Le briquetier de profession reconnaît presque à coup sûr et rien qu'au toucher si une terre peut servir à une fabrication.

Qualité des briques. — La brique est de bonne qualité quand elle est bien moulée, à vives arêtes, non ébréchée, exempte de trous et de boursouflures. Frappée avec un corps dur, elle rend un son clair, plein et vif. Elle a le grain fin, serré et homogène. Sa cassure est nette. Elle résiste à l'action de la gelée et des variations atmosphériques. Elle ne renferme pas de grains calcaires ou pyriteux. Elle ne s'émiette pas sous les doigts ni ne se désagrège dans l'eau.

Si elle contient du carbonate de calcium, il faut la revêtir de silicate, comme on le fait pour les pierres calcaires. Sa résistance aux intempéries est alors augmentée. En cet état, elle est d'un bon emploi pour la décoration des édifices.

Sa coloration habituelle est le rouge brun foncé. Sa surface est quelquefois partiellement vitrifiée, mais ce caractère est trompeur, et il n'est que l'indice d'un degré élevé de cuisson et de la présence de matières fusibles. En effet, une brique médiocre est en partie vitrifiée quand le fabricant a eu soin de parsemer sa surface avant cuisson de sable siliceux et de mâchefer. La belle apparence qui en résulte n'en rend pas la brique meilleure.

Une brique chauffée au rouge et sur laquelle on verse de l'eau froide peut être considérée comme très dure si elle ne se fendille pas.

La brique de mauvaise qualité est jaune rougeâtre. Par le choc elle rend un son sourd et fêlé. Son grain est gros et mou. Elle est friable, elle se casse avec facilité, elle absorbe l'eau très rapidement. Enfin elle est gélive et insuffisamment cuite. Dans ce dernier cas, elle rend terreuse l'eau dans laquelle on la plonge. Elle peut, de plus, à la longue, se recouvrir de mousse dont les racines deviennent une cause de destruction.

La coloration rouge ou jaune des briques est due à la présence de l'oxyde ferrique. Si cet oxyde se trouve à l'état anhydre, la couleur est rouge ; s'il se trouve à l'état hydraté, la brique est jaune.

Il arrive aussi parfois que la coloration spéciale des briques est due à d'autres substances, telles que le carbonate de calcium, les matières combustibles ou bitumineuses, etc.

Variétés de briques. — Dans ce qui précède, on a envisagé surtout les briques provenant de la cuisson des terres argileuses, mais il existe d'autres produits auxquels on donne également le nom de briques.

Ce sont d'abord les *briques légères* fabriquées avec des tufs siliceux auxquels on ajoute une petite quantité d'argile grasse et de magnésite. Leur résistance est assez élevée. Leur légèreté les fait employer pour la construction de voûtes ou de murs peu épais. Elles surnagent lorsqu'on les laisse tomber dans l'eau.

D'autres briques légères sont confectionnées en incorporant à la pâte argileuse des substances végétales, telles que de la sciure de bois et des débris de paille ou, des substances minérales, comme le coke, le poussier de houille, les escarbilles de foyers, etc. Par la cuisson, ces matières se carbonisent, laissent des vides, diminuent le retrait et hâtent la dessiccation.

Les *briques réfractaires* constituent un autre genre de produits. Elles sont surtout destinées à former le revêtement intérieur des fours ou des hauts fourneaux et doivent par

conséquent résister à l'action des hautes températures. Elles doivent être inaltérables et infusibles. On fabrique d'excellentes briques réfractaires en employant une pâte composée de quartz très fin et de grains de quartz grossiers mélangés à une quantité convenable de chaux. On juge d'une façon approximative la qualité réfractaire d'un produit en soumettant les briques au feu violent d'un four à porcelaine.

La fabrication des briques réfractaires constitue une industrie toute spéciale. Ces briques sont composées différemment suivant l'usage auquel on les destine. C'est ainsi que l'on fabrique des briques à base de quartz (grès, schistes siliceux, granit, ganister, roches talqueuses, briques Dinas), à base d'alumine (argile, sable siliceux, bauxite). On en fait encore en oxyde de fer, battitures, fer chromé, dolomie, carbone, scories.

Les *briques creuses*, de composition analogue à celle des briques pleines, sont très recherchées en raison de leur prix modique et de leur grande légèreté.

Elles possèdent de plus l'avantage d'être mauvaises conductrices de la chaleur et d'offrir une assez grande résistance à la rupture. Elles jouent, en outre, le rôle de matière isolante par rapport à l'humidité et résistent aux actions atmosphériques.

Les briques sont d'un emploi fréquent. On s'en sert dans la construction ordinaire, pour les cheminées, pavages, carrelages, réservoirs, aqueducs, revêtements de hauts fourneaux, etc.

Par l'emploi judicieux de briques de parement et de motifs céramiques, les architectes parviennent à donner aux façades des habitations un aspect harmonieux et agréable.

En Amérique, le pavage en briques a pris une extension considérable, puisque dans certaines grandes villes la moitié de la surface des rues est constituée par ce genre de chaussée. Cent soixante-quinze usines, dont plusieurs fabriquent plus d'un million de briques par an, fournissent des produits qui sont vendus sur place à raison de 50 francs les 1.000. Les argiles servant à la fabrication de ces briques doivent posséder une certaine fusibilité. Voici, par exemple, la composition d'une argile employée en Ohio :

Silice	57,0
Alumine	21,3
Oxyde ferrique	7,3
Chaux	0,3
Magnésie	1,5
Alcalis	4,0
Perte au feu	7,3
Produits non dosés et pertes	1,3
TOTAL	100,0

Les briques ont des dimensions différentes suivant les lieux de fabrication ou suivant les usages auxquels on les destine; aussi a-t-on au sujet de leur emploi un choix considérable.

Le poids d'un mètre cube de maçonnerie de briques varie de 1.700 à 1.800 kilogrammes en moyenne. On admet qu'un mètre cube exige $0^{m3},20$ de mortier. On compte qu'il faut 635 briques de Bourgogne par mètre cube de maçonnerie.

La résistance à l'écrasement par centimètre carré peut être considérée comme égale à:

33	kilogr.	pour la brique	crue;
36	—	—	rouge pâle;
39	—	—	jaune (cuite à la houille);
56	—	—	rouge;
99	—	—	jaune vitrifiée;
150	—	—	dure très cuite.

Le coefficient de dilatation linéaire de la brique est de 0,000005.

En outre des produits précédents il convient de mentionner encore les *briques de liège*, que l'on utilise quelquefois dans les murs de refend, cloisons, combles, salles de bains, etc. A l'Exposition universelle de 1900 on a pu voir des pavillons construits avec ces matériaux, dont les principaux avantages sont d'être insonores, mauvais conducteurs de la chaleur, imputrescibles, préservateurs de l'humidité. Ces sortes de briques peuvent se casser, se scier. Elles offrent une grande résistance et adhèrent au mortier, au plâtre, à la chaux et au bitume.

De la poudre de liège mélangée au plâtre sert aussi à la

confection de briques qui ont $0^m,22 \times 0^m,11 \times 0^m,06$ et dont le poids est de 550 kilogrammes au mille.

Il y a encore les briques de porcelaine, de silice, d'amiante, de laitier, ainsi que les briques silico-calcaires, qui servent plutôt à des usages spéciaux.

Enfin il convient de citer les *briques armées* qui, dans le système Cottancin, présentent une ossature métallique dont les brins de la chaîne ou de la trame passent, dans le cas de briques pleines, dans les joints horizontaux et verticaux garnis de mortier de ciment et, dans le cas de briques creuses, dans les trous que possèdent ces briques. Ce système de construction a été adopté, à l'Exposition de 1900, dans les façades du pavillon de la République de San-Marin. Les murs étaient construits en briques armées formant ossature avec remplissage intérieur en carreaux de plâtre armé. Une autre application en était faite également dans le massif supportant les appareils de la Société Cockerill au Champ-de-Mars.

2° TUILES

Les tuiles sont de précieux matériaux de couverture pour cette raison qu'il est facile de leur donner des formes très variées répondant à toutes les exigences de la pratique.

Suivant l'aspect extérieur qu'elles présentent, on les dénomme tuiles plates, creuses, flamandes (ou pannes), mécaniques, etc.

Les tuiles romaines sont courbes; elles s'emploient encore dans bien des cas. Les tuiles italiennes affectent une forme trapézoïdale avec saillies latérales. Les tuiles ogivales ou en écailles trouvent leur application en architecture.

Qualité des tuiles. — La tuile de bonne qualité est sonore, imperméable, de couleur franche, bien moulée. Elle n'est pas calcaire, elle ne contient pas de nœuds de chaux. Sa texture n'est ni feuilletée, ni lamelleuse. Elle supporte le poids d'un homme placé à pieds joints en son milieu. Sous le choc d'un corps dur, elle rend un son franc, clair, un peu métallique.

Une brique est de mauvaise qualité quand elle ne réunit pas les conditions précédentes. On la reconnaît surtout au son sourd, faux ou fêlé qu'elle rend lorsqu'on la frappe avec un objet dur.

La terre employée à la fabrication des tuiles est la même que celle qui sert à la confection des briques ; cependant on apporte un plus grand soin à sa préparation. On recherche une argile plus fine et exempte de matières étrangères. La pâte dont on se sert doit être bien corroyée. Par contre, sous le rapport de la fusibilité, il n'est pas nécessaire d'attacher aux tuiles la même importance que celle que l'on exige des briques destinées, par exemple, au revêtement intérieur des fours.

La couleur noire ou grise que l'on donne quelquefois aux tuiles est due à un dépôt de charbon résultant de la fumée

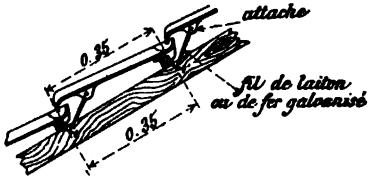

Fig. 110. — Tuile à attaches.

que dégage, pendant la cuisson, la combustion de branches de bois feuillues.

Les tuiles recouvertes d'une glaçure à base de plomb sont à peu près complètement abandonnées aujourd'hui, en raison de leur prix de revient élevé. Ces produits fortement colorés ont fait place à d'autres matériaux à glaçure transparente ou de couleur peu foncée que l'on obtient à meilleur marché.

Les tuiles de Bourgogne sont de deux modèles différents dont les dimensions sont les suivantes : $300 \times 250 \times 15$ et $200 \times 195 \times 15$. Leurs poids respectifs sont de $2^{kg},400$ pour le premier modèle et de $1^{kg},320$ pour le second.

Certains industriels fabriquent des produits dont ils ont la

spécialité. C'est ainsi que l'usine *Müller* a imaginé une tuile spéciale, dite *à attaches* (*fig.* 110), destinée à résister à la violence des vents dont la fréquence est si grande dans les ports maritimes. La partie inférieure de cette tuile porte une encoche munie d'un trou dans lequel passe un fil de laiton ou de fer galvanisé. Ce fil est attaché à un clou que l'on fixe dans le chevron ou dans la latte.

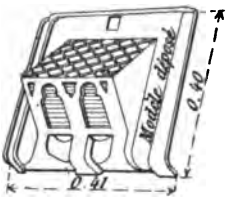

Fig. 111. — Tuile-marche.

La même usine fabrique des passages de tuyaux, des membrons pour toitures à brisis et des tuiles-marches ; ces dernières forment un chemin très utile aux couvreurs, qui évitent de la sorte tout danger de glissement sur des toitures très inclinées (*fig.* 111).

Pour mémoire, on citera encore les chaperons, mitrons, lanternes, conduits de ventilation, chéneaux, garnitures de rive et frontons, qui ne sont, en somme, que des tuiles de formes spéciales.

La *tuilerie mécanique de Jeandelaincourt* a présenté à l'Ex-

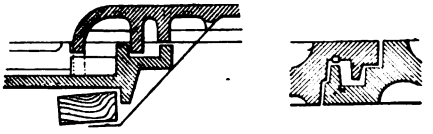

Fig. 112. — Tuile à emboîtement et à double recouvrement.

position universelle de 1900 (*fig.* 112) une tuile à double emboîtement et à double recouvrement dont la surface est sillonnée de deux canaux parallèles assez profonds, séparés l'un de l'autre par une nervure en forme de dos d'âne.

Des expériences faites au Laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées sur quelques-uns de ces matériaux ont donné les résultats suivants :

Moyennes :

Poids des tuiles après dessiccation.....	2^{kg},549
Poids des tuiles après imbibition de 24 heures..	2 ,832
Proportion pour 100 en poids d'eau absorbée....	11 ,1 0/0

Les essais de rupture à la flexion sont consignés dans le tableau ci-après :

NUMÉROS des TUILES	DIMENSIONS DES TUILES			DISTANCE entre LES POINTS d'appui	CHARGE TOTALE ayant produit la rupture des tuiles à l'état	
	LONGUEUR	LARGEUR	ÉPAISSEUR		desséché	imbibé
4	0,404	0,218	0,0083	0,30	»	350 kg.
5	0,406	0,221	0,0082	0,30	»	375
6	0,402	0,220	0,0085	0,30	»	390
10	0,403	0,221	0,0080	0,30	300 kg.	»
11	0,401	0,221	0,0087	0,30	360	»
12	0,405	0,221	0,0082	0,30	345	»

La *Société des tuileries mécaniques du Berry et de Bordeaux* a exposé à la même époque une tuile à talon qui sert de revêtement pour les toits à la Mansard, le faîte des murs, les costières de lucarne, les avant-corps, etc. Cette tuile comporte à la partie inférieure deux talons qui lui permettent de s'appuyer sur des lattes dans le cas d'une charpente en bois, ou sur des cornières dans le cas d'une charpente en fer.

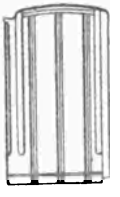

Fig. 113. — Tuile isolante.

La *grande tuilerie parisienne d'Ivry-sur-Seine* a imaginé une tuile *isolante* (*fig.* 113) formée de deux parois minces présentant un espace de $0^m,03$; ces parois sont reliées entre elles par des cloisons longitudinales. Cette tuile est légère, de faible conductibilité, et possède à la flexion une résistance considérable.

La même usine fabrique aussi une tuile à double attache convenant aux toitures des villes maritimes ou aux endroits exposés à l'action des vents.

Voici quelques chiffres concernant les tuiles fabriquées par cette usine en ce qui concerne les tuiles grises et les tuiles roses ordinaires :

DÉSIGNATION	POIDS	CHARGES DE RUPTURE ÉVALUÉES EN KILOGRAMMES ET APPLIQUÉES	
		transversalement à la tuile dans le sens de la longueur	par répartition uniforme sur la face supérieure
Tuiles grises.....	3,037	246 kg.	303 kg.
Tuiles roses ordinaires ..	3,066	273	404

On voit que sous le rapport de l'emploi un choix considérable de types est offert à l'architecte qui utilise ce mode de couverture.

ANALYSE CHIMIQUE DES BRIQUES ET DES TUILES

La marche à suivre pour l'analyse des briques et des tuiles est absolument identique à celle qui a été décrite pour l'analyse des argiles. Avant de soumettre ces matériaux aux opérations analytiques, il convient de les pulvériser finement.

Voici quelques analyses de briques :

ÉLÉMENTS DOSÉS	BRIQUE CRUE	BRIQUES ORDINAIRES			BRIQUES RÉFRACTAIRES	
Silice.....	91,10 résidu insoluble	52,10	77,52	84,60	74,20	74,45
Alumine	2,25	13,30	12,42	7,20	22,25	22,30
Oxyde ferrique.....		5,70		6,25	0,35	0,30
Chaux	0,40	26,20	1,49	0,80	0,40	0,50
Magnésie	0,05	1,50	0,28	0,40	traces	traces
Perte au feu.....	5,80	1,20	8,09	0,35	2,80	2,45
Produits non dosés et pertes.....	0,40	»	0,20	0,40	»	»
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

A l'analyse chimique peuvent être rattachés les essais aux acides faits sur briques vitrifiées.

La brique réduite en poudre fine est soumise pendant un certain temps (trente-six heures par exemple), dont une partie (douze heures) à chaud, à l'action de l'acide fumant de Nordhausen et de l'eau régale. On pèse ensuite l'échantillon, qui a perdu une partie de son poids. La comparaison du résultat obtenu avec les résultats d'expériences semblables faites sur des briques connues permet de se faire une opinion sur la valeur de la résistance à l'acide de cette brique.

ESSAIS

Essais chimiques. — 1° *Recherche de la chaux et de la magnésie.* — Dans le but de déterminer s'il existe dans les terres cuites de la chaux ou de la magnésie caustique, on immerge cinq échantillons pendant trois heures dans l'eau bouillante, et on observe si, dans ces circonstances, il s'est produit des exfoliations.

2° *Détermination des sels solubles.* — Pour déterminer la proportion de sels solubles que peut contenir une terre cuite, on prend cinq échantillons choisis de préférence dans le milieu des terres cuites, et on les pulvérise de manière à les faire passer entièrement par le tamis de 900 mailles. On prend 25 grammes de la poudre ainsi obtenue, que l'on fait bouillir pendant une heure dans 250 grammes d'eau distillée, en remplaçant l'eau évaporée; après filtration, on évapore à siccité et on pèse le résidu obtenu.

ESSAIS DE CHANTIER

Les essais de chantier effectués sur les briques sont assez peu nombreux.

On apprécie la dureté d'une brique en rayant sa surface à l'aide d'une pointe d'acier. On se rend compte de sa sonorité en frappant quelques coups sur une de ses faces avec un objet résistant. Enfin on évalue le degré de résistance qu'elle présente en heurtant fortement deux briques semblables ou en les laissant tomber sur un corps dur pour essayer de les briser.

En ce qui concerne les tuiles, on a vu que ces matériaux doivent supporter sans se casser le poids d'une personne placée à pieds joints en leur milieu.

ESSAIS DE LABORATOIRE

Échantillons. — Les essais des produits céramiques doivent toujours être faits sur les produits marchands.

Si l'on veut connaître le plus exactement possible la valeur d'une fabrication, il convient d'opérer sur des échantillons aux différents degrés de cuisson. On se contente souvent d'examiner les échantillons les plus faiblement cuits, qui se reconnaissent facilement à l'aspect et plus particulièrement à une moindre dureté et à des dimensions légèrement plus grandes que la moyenne.

Prescriptions générales. — On indique la marque commerciale des échantillons, leur forme, l'état de leurs arêtes et de leurs surfaces, ainsi que leur couleur.

Pour les briques et les carreaux, on mesure les dimensions dans le sens de la longueur, de la largeur et de l'épaisseur; pour les tuiles, on mesure la longueur et la largeur et on dresse des croquis ou coupes suffisants pour indiquer d'une façon claire les creux et les saillies ainsi que les emboîtements que peuvent présenter les échantillons. Enfin, pour les tuyaux, on mesure le diamètre intérieur, la longueur utile du tuyau en dehors de l'emboîtement, l'épaisseur de la paroi, ainsi que la forme et les dispositions de l'emboîtement s'il y a lieu.

On vérifie pour les briques et tuiles les dimensions, qui pour une même pièce doivent être semblables ; on signale l'écart lorsqu'il dépasse 1 0/0.

Lorsque le laboratoire d'essai dispose d'un nombre suffisant d'échantillons de même provenance, il est utile qu'il mesure, d'une part, les plus cuits ou les plus petits et, d'autre part, les moins cuits ou les plus grands. Il signale, s'il y a lieu, les différences observées.

ESSAIS PHYSIQUES

1° **Observation de la structure ou de l'homogénéité.** — L'observation de la structure ou de l'homogénéité consiste dans l'examen de la cassure, fait à l'œil nu ou à la loupe.

Il convient de signaler :

a) L'aspect de la cassure, soit grenue et à arrachements plus ou moins prononcés, soit lisse ou à surface conchoïdale ;

b) La grosseur du grain, en indiquant, d'après la classification adoptée pour les pierres de construction naturelles, si le grain est fin, moyen ou grossier et si les grains sont uniformes ou de dimensions différentes ;

c) L'homogénéité, en faisant observer si la masse est entièrement, moyennement ou peu homogène, s'il existe des plans de feuilletage ou de clivage plus ou moins nombreux, plus ou moins accentués.

2° **Poids spécifique.** — La détermination du poids spécifique de la matière sera faite sur de la poudre provenant de fragments pulvérisés.

La poudre, ayant passé à travers le tamis de 900 mailles et étant débarrassée des poussières les plus fines au moyen d'un tamisage à travers le tamis de 4.900 mailles, est desséchée à la température de + 110°.

La détermination du poids spécifique est faite au moyen du volumètre.

On ne peut employer d'autre appareil que ceux permettant d'obtenir dans les conditions d'emploi ordinaires la première décimale avec certitude et la deuxième avec une approximation de deux unités.

Le liquide dont on se sert est la benzine ou l'essence minérale.

La température doit rester constante pendant toute la durée de l'opération ; elle ne doit pas être supérieure à + 15°.

3° **Densité apparente.** — Cette détermination doit être faite, autant que possible, sur des échantillons restés entiers, après dessiccation à la température de + 30 à + 40°C.

Quand les échantillons ont une forme géométrique régulière permettant d'en déterminer le volume par mesurage, on se sert d'un pied à coulisse ordinaire donnant l'approximation au dixième de millimètre ; le poids est déterminé au moyen d'une balance sensible au demi-centigramme.

Quand les échantillons sont de forme irrégulière ou présentant des angles rentrants, on détermine le volume et par suite la densité apparente au moyen de la différence du poids de l'échantillon dans l'air et dans l'eau. On a soin d'enduire préalablement la surface d'un vernis capable d'empêcher l'entrée de l'eau. Une mince couche de suif fondu appliquée au pinceau et étendue avec le doigt remplit très bien ce but.

4° **Porosité absolue.** — La porosité absolue est déduite de la différence entre le poids spécifique et la densité apparente.

5° **Porosité relative ou poids d'eau absorbée dans un temps déterminé.** — La détermination du poids d'eau absorbée se fait sur une série de trois échantillons au moins de même nature préalablement désséchés, soit à l'air libre, soit à l'étuve, à la température de + 30 à + 40° C. Il convient, autant que possible, d'opérer sur des échantillons entiers et non sur des fragments.

Après dessiccation, les échantillons sont immergés dans l'eau jusqu'à la moitié de leur épaisseur pendant douze heures, puis submergés complètement encore soit pendant douze heures, trente-six heures, sept jours ou vingt-huit jours [1].

1. Dans le cas où le temps d'immersion doit dépasser quarante-huit heures, si l'on veut abréger la durée de l'expérience, on peut se servir du procédé d'imbibition à l'aide de la cloche pneumatique, tel qu'il est décrit pour les essais des pierres de construction naturelles.

Si les échantillons contiennent une proportion notable de chaux, de magnésie ou de sels solubles, il est bon de recommencer une ou deux fois l'expérience sur les mêmes échantillons.

La quantité d'eau absorbée ou porosité relative doit toujours être calculée en volume, mais on indique aussi le pour cent d'eau en poids.

6° **Perméabilité.** — *Tuiles.* — L'essai se fait sur au moins 3 tuiles entières préalablement immergées pendant quarante-huit heures comme il a été dit au paragraphe 5. On fixe au moyen de ciment pur, vers le milieu de la face supérieure de chaque tuile placée horizontalement, un tube en verre de $0^m,035$ de diamètre intérieur et de $0^m,11$ de hauteur. Le tube, fermé à sa partie supérieure par un bouchon en caoutchouc, est mis en communication avec un réservoir donnant une charge d'eau de $0^m,10$.

On recueille au moyen d'un réservoir placé sous la face inférieure l'eau qui peut traverser chaque tuile.

La perméabilité est déterminée par le volume d'eau écoulé pendant une heure, après une durée d'expérience de vingt-quatre heures, sept jours ou vingt-huit jours.

Au début de l'essai, on multiplie les constatations s'il y a lieu.

7° **Essais de résistance à la gelée.** — L'épreuve de résistance à la gelée doit, autant que possible, porter sur des produits entiers.

On peut exceptionnellement cependant faire l'essai sur des fragments. Dans ce cas, on doit protéger les parties coupées ou cassées des éprouvettes par un vernis ou une mince couche de suif dans le but de ne laisser libres à la pénétration de l'eau pendant l'immersion que les seules faces ordinairement vues des échantillons.

Les essais de gélivité normaux, dirigés comme il a été dit pour les pierres naturelles, comprennent :

a) L'examen des échantillons avec le secours de la loupe, en cherchant à se rendre compte si des gerçures ou des éclatements se sont produits dans ces échantillons après avoir

été soumis à l'action de gels ou dégels successifs répétés jusqu'à 25 fois ;

b) La détermination de la perte de poids des échantillons gelés [1].

Il faut employer pour ces essais au moins :

3 (ou 5) éprouvettes imbibées d'eau par immersion pendant vingt-quatre heures ;

3 (ou 5) éprouvettes imbibées d'eau à saturation.

ESSAIS MÉCANIQUES

Briques et matériaux analogues

1° **Résistance à la rupture par écrasement.** — L'essai de résistance à la rupture par écrasement est fait sur des morceaux de forme à peu près cubique, obtenus pour les briques ordinaires, par exemple, en superposant deux demi-briques et en les reliant par une mince couche de mortier de ciment Portland pur.

Les surfaces de compression sont rendues rigoureusement parallèles par un enduit fait avec une couche de mortier semblable.

Comme pour les pierres de construction naturelles, les essais de résistance à l'écrasement peuvent être faits au moyen d'appareils à levier ou au moyen de presses hydrauliques.

Les éprouvettes doivent être placées entre les plaques de compression recouvertes d'une feuille de carton mince ; il est utile qu'un des deux plateaux de compression soit mobile dans tous les sens.

Les dimensions des faces portantes sont indiquées dans

1. Si les échantillons supportent sans détériorations les essais de résistance à la gelée, il y a lieu de comparer les résistances à la compression et à la flexion de ces échantillons, après nouvelle dessiccation, avec celles d'échantillons de même provenance soumis aux mêmes efforts après dessiccation, mais sans avoir subi l'action de la gelée.

le procès-verbal d'essai en même temps que la résistance rapportée au centimètre carré de surface portante.

L'essai porte sur au moins 3 (ou 5) éprouvettes du même échantillon.

La moyenne des résultats fournis est calculée.

Il est bon de faire l'essai sur deux séries d'éprouvettes, l'une à l'état desséché, l'autre à l'état d'imbibition, en indiquant le degré d'imbibition.

2° **Résistance à la rupture par flexion.** — *Briques.* — Les essais de résistance à la rupture par flexion se font, pour les briques ordinaires, sur des produits entiers posés sur deux couteaux placés à la distance de $0^m,20$ et chargés en leur milieu d'une façon continue jusqu'à rupture.

On indique le poids brut qui détermine la rupture de chaque éprouvette.

Les produits ayant une longueur plus grande que les briques ordinaires peuvent être essayés avec une portée, entre les deux couteaux d'appui, égale à la portée qu'on donne en pratique à ce genre de produits.

Tuiles. — Les essais de résistance à la rupture par flexion sont faits sur des tuiles entières posées sur deux couteaux, et chargées en leur milieu d'une façon continue jusqu'à rupture.

Lorsque les tuiles n'ont pas un profil rectiligne, on établit de petites banquettes transversales horizontales en ciment Portland pur, larges de 1 centimètre, pour recevoir les supports et le couteau médian, dans le but de niveler les ondulations et de répartir les efforts uniformément sur toute sa largeur.

Une de ces banquettes est placée à l'endroit où, dans la couverture, la tuile doit s'appuyer sur le liteau, et l'autre à l'endroit où elle repose sur la tuile inférieure.

On indique la charge qui a produit la rupture.

Il est bon de faire l'essai sur des tuiles imbibées d'eau, en indiquant le degré d'imbibition.

3° **Résistance à l'usure par frottement.** — La détermination de la résistance à l'usure par frottement est faite

dans les mêmes conditions que pour les pierres de construction naturelles, tant en ce qui concerne la dimension des éprouvettes que pour l'essai proprement dit.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les briques qui offrent un écart de dimension supérieur à 1 0/0 de la moyenne doivent être rebutées. Les dimensions sont mesurées suivant les arêtes.

L'essai de porosité montre si la brique absorbe une trop grande quantité d'eau. Une bonne brique n'absorbe pas plus du cinquième de son poids d'eau. Elle est sèche ou donne cette impression au toucher. Une brique qui n'absorbe pas d'eau a subi une forte cuisson. Le mortier adhère mal à sa surface ; elle est bonne conductrice de la chaleur. Elle convient, par contre, dans les terrains humides et pour les pavages.

La gelée ne doit pas avoir d'action sur ce produit. Si l'essai de gélivité a donné un résultat incertain après 25 gels et dégels successifs, il vaut mieux ne pas employer la brique ou la tuile dans la construction.

Une bonne brique ne s'écrase que sous une charge minima de 100 à 150 kilogrammes par centimètre carré, une brique de moyenne qualité sous une charge de 50 à 100 kilogrammes, une brique médiocre sous une charge de 20 à 50 kilogrammes.

La charge permanente à adopter est au plus du dixième de la charge de rupture par écrasement. S'il s'agit d'un pilier long et isolé, il est prudent de ne pas dépasser le vingtième de la charge de rupture.

Les argiles contiennent quelquefois des grains de carbonate de calcium ou de magnésium qui, par la cuisson, donnent de la chaux ou de la magnésie caustiques. Ultérieurement et sous l'influence de l'humidité, ces bases s'hydratent, augmentent de volume et finissent par faire éclater les briques. La présence de ces éléments est donc à redouter.

Il en est de même de certains sels solubles, sulfates,

chlorures, silicates de calcium, de sodium, de potassium, de magnésium.

La brique ne doit pas non plus renfermer de grains de pyrites qui produiraient un effet analogue à celui de la chaux.

Les Allemands adoptent souvent les limites suivantes comme indices de la bonne qualité de briques servant à la confection de murs ou de pavages :

	I	II	III
Poids d'eau absorbée pour 100 parties de matières sèches	12 à 24 0/0	4 à 10 0/0	5 0/0
Densité apparente	1,5 à 2	1,9 à 2	2 à 2,4
Résistance à l'écrasement	200^{kg}	300 à 500^{kg}	450 à 600^{kg}
Résistance à la traction	60 à 70^{kg}	70 à 120^{kg}	120 à 150^{kg}
Dureté dans l'échelle de Mohs	3 à 6	6 à 7	8 à 9

EXTRAIT DU CAHIER DES CHARGES GÉNÉRAL DU MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

ART. 17. — **Briques.** — Les briques ont les dimensions fixées par le devis particulier.

Elles sont fabriquées en terre soigneusement corroyée ; elles sont bien moulées, sans gerçures ni bavures, bien cuites, mais non vitrifiées, non friables, et elles doivent rendre un son plein et vif sous le choc du marteau.

Toutes les briques contenant des fragments de chaux ou de marne sont rebutées.

Les briques employées en parement sont choisies parmi les moins poreuses et les plus régulières.

CHAPITRE XXIII

FERS, ACIERS, FONTES

Les trois composés ferreux connus sous les noms de fer, acier, fonte forment une série continue dont le premier terme, le fer chimiquement pur, ne contient pas de carbone et dont le dernier terme, la fonte, peut renfermer jusqu'à 4,6 0/0 de ce métalloïde. Entre ces limites extrêmes s'intercalent un certain nombre de produits intermédiaires dont les propriétés sont différentes.

En dehors du fer qui constitue leur partie essentielle, ces composés contiennent des métalloïdes et des métaux en faible quantité, il est vrai, mais dont la présence est néanmoins suffisante pour modifier profondément leur nature. Les corps simples que l'on rencontre le plus souvent dans ces produits sont: le carbone, le silicium, le soufre, le phosphore, le manganèse et plus rarement le nickel, le chrome, le tungstène, le molybdène, le vanadium, etc. Ces derniers métaux sont ajoutés à dessein dans le but d'obtenir des produits spéciaux à certains usages.

Le fer usuel contient assez peu de carbone. Il se divise commercialement en plusieurs qualités dénommées dans le tableau des pages 366 et 367, extrait de l'ouvrage *Fer, fonte et acier*, de M. J. Résal.

Comme on le voit par ce tableau, le fer est un métal résistant. Il fond vers 1.500° et se soude à lui-même lorsqu'il est porté au rouge blanc.

L'acier constitue le deuxième terme de la série carburée. Dans le commerce, il prend les désignations d'acier très dur, dur, mi-dur, mi-doux, doux, très doux et extra-doux. Les propriétés qui correspondent à ces diverses natures d'acier sont indiquées ci-après, pages 368 et 369 (M. J. Résal).

QUALITÉ	COMPOSITION ÉLEMENTAIRE pour 100					RÉSISTANCE A LA TRACTION ET DUCTILITÉ						EMPLOIS
						TOLES : ÉPAISSEURS moyennes de 5 à 20 millim.				Plats et profilés, U, cornières, tés simples et doubles, barres, fers à barrots		
	C	Si	Mn	S	Ph	Sens	Limite d'élasticité kg : mm²	Limite de rupture kg : mm²	Allongement de rupture 0/0 mesuré sur 200 mm.	Limite de rupture kg : mm²	Allongement de rupture 0/0	
Commun ou n° 2	0,08	0,21	0,08	0,04	0,30	long	20	32	6	34	8	Fers communs pour boulonnerie et serrurerie, tire-fonds ; à l'état corroyé, sert pour les rivets du commerce, plaques tournantes, barreaux de grilles, arbres de machines, profilés du commerce, ponts, charpentes pour parquets, chaudières ordinaires du commerce, caisses de cémentation, brancards de wagons, réservoirs. Les tôles de cette qualité ne doivent subir qu'un forgeage simple et des efforts statiques.
						travers	17	29	3,5			
Ordinaire ou n° 3	0,08	0,20	0,09	0,026	0,22	long	21	33	9	35	12	Fers ordinaires pour maréchalerie et serrurerie, fers à cheval, profilés ordinaires des chemins de fer, tôles devant supporter un léger emboutissage au marteau, corps cylindriques, ponts métalliques. Qualité « commune Marine ».
						travers	18	30	5			

Fort ou n° 4	0,11	0,20	0,10	0,015	0,16	long travers	21,5 19	33,5 31	13 8	36	15	Fers pour boulonnerie et serrurerie de qualité supérieure, fers à bœufs, corroyé, fournit les rivets de bonne qualité pour ponts et charpentes de navires; profilés supérieurs, masses de mines, corps cylindriques, viroles, tôles avec bords tombés au marteau pour chaudières. Qualité « ordinaire Marine ».
Fort supérieur ou n° 5	»	»	»	»	»	long travers	22 20	34 32	16 12	»	»	Fers forts, tôles à chaudières pour hautes pressions, emboutie et bords tombés à la presse, plaques AB des boîtes à fumée. Qualité « supérieure Marine ».
Fin ou n° 6	0,12	0,14	0,09	0,012	0,105	long travers	23 21	35 32	18 14	»	»	Fers pour pièces de machines, tiges de tiroirs, bielles d'accouplement, essieux, arbres moteurs, fers profilés de qualité extra ayant à supporter un travail pénible, maillons de chaînes en corroyé, rivets de machines, tôles à chaudières de locomotives, foyers, plaques à tubes, plaques de boîtes à fumée, emboutis difficiles. Qualité « fine Marine ».
Fin extra ou n° 7	0,15	0,10	0,078	0,01	0,053	long travers	24 22	36 34	21 16	»	»	Bielles motrices, tubes et tiges de pistons, essieux droits et coudés, tailanderie en général, pièces mécaniques très tourmentées, d'un travail difficile et soumises à de grands efforts, tôles de coups de feu, emboutis spéciaux, blindage des ponts de navires. Qualité « fine Marine », assimilable à la qualité au bois.

ÉCHELLE DE DURETÉ	MODE de FABRICATION	COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE pour 100					DEGRÉ de TREMPE	ÉTAT
		Mn	C	Si	Ph	S		
Très dur...	Martin acide	0,70	0,60	0,30	0,055	0,030	Trempe très fort	Non trempé Trempé
Dur.....	»	0,60	0,50	0,25	0,055	0,030	Trempe très bien	Non trempé Trempé
Mi-dur.....	Martin acide	0,45	0,40	0,20	0,055	0,030	Trempe bien	Non trempé Trempé
Mi-doux....	»	0,35	0,35	0,15	0,055	0,030	Trempe peu	Non trempé Trempé
Doux.....	Martin acide — basique Bessemer basique	0,25 0,55 0,35	0,28 0,19 0,16	0,10 0,030 traces	0,055 0,045 0,045	0,030 0,025 0,025	Ne trempe pas ou à peine	Non trempé Trempe
Très doux soudable.	»	»	»	»	»	»	Ne trempe pas	Non trempé Trempé
Extra-doux soudant..	Martin basique Bessemer basique	0,45 0,30	0,14 0,13	0,03 traces	0,025 0,03	0,020 0,020	Ne trempe pas	Non trempé Trempé

LIMITE d'élasticité en kg. par mmq. de section	LIMITE DE RUPTURE en kg. par mmq. de section	ALLONGEMENT DE RUPTURE POUR 100 mesuré sur 200 millim. de long	STRICTION (Rapport de l'aire de la section de rupture à celle de la section primitive)	EMPLOIS
48-43	90-80	6-11	0,84-0,79	Ressorts, matrices, bouterolles, coutellerie, scies, pièces pour filatures. Poinçons, limes, aimants, couteaux de balances.
90-80	140-120	2-5	0,98-0,93	
43-38	80-70	11-15	0,79-0,73	Ressorts, pièces d'armes, canons, masses, marteaux, rails, bandages, bêches, sonnettes, socs de charrues, étampes.
80-68	120-105	5-7	0,93-0,87	
38-35	70-60	15-19	0,73-0,62	Rails, éclisses, pièces d'armes, canons, pelles, pioches, bêches, fourreaux de sabres, glissières, essieux, frettes, mandrins, clavettes.
68-60	105-90	7-11	0,87-0,72	
35-33	60-50	19-23	0,62-0,53	Pièces mécaniques, versoirs, pelles, étrilles, arbres de transmission, essieux de wagons, tire-fonds, tôles pour fermetures, scies à chaud, godets de dragues, fourches, vis, goujons, lunetterie.
60-50	90-70	11-16	0,72-0,58	
33-29	50-45	23-25	0,53-0,46	Tôles pour construction de navires et de ponts, profilés divers, affûts, boulons, pièces mécaniques, vis de bandages, constructions de toutes sortes.
50-40	70-55	16-19	0,58-0,50	
29-26	45-40	25-28	0,46-0,38	Tôles et profilés pour chaudières, rivets de chaudières, pièces cémentées, tôles pour pièces embouties, obus à mitraille, tubes, étuis sans soudure.
40-34	55-48	19-22	0,50-0,40	
29-26	40-35	28-32	0,38-0,31	Tréfilage, tôles minces embouties, qualité supérieure pour tôles à chaudières, foyers, viroles, communications soudées ; remplace le fer de Suède ; clous à cheval, bandages de roues, rivets, pièces cémentées, en général tôles très façonnées, emboutis compliqués.
34-30	48-40	22-28	0,40-0,32	

Les chiffres ci-dessus montrent que l'acier présente une résistance beaucoup plus grande que celle du fer.

L'acier a son point de fusion situé vers 1.400°.

Il se soude à lui-même. Sa caractéristique est de pouvoir prendre la trempe, c'est-à-dire d'acquérir une plus grande dureté lorsque, après avoir été chauffé, il est brusquement refroidi dans un bain d'eau ou d'huile.

Le métal contenant plus de 1,5 et moins de 2,5 0/0 de carbone est un produit inutilisable en raison du peu de résistance qu'il présente et de la facilité avec laquelle il casse ; on l'appelle *acier sauvage*. Cette solution de continuité dans l'emploi de la série carburée rappelle beaucoup celle des chaux limites dans les produits hydrauliques.

La fonte forme le troisième et dernier terme de la série des métaux ferreux. Elle peut absorber jusqu'à 4,6 0/0 de carbone. Elle se divise en fonte blanche, fonte truitée et fonte grise. Sa résistance est bien moindre que celle des fers et des aciers puisqu'elle n'est que de 13 kilogrammes par millimètre carré. Elle fond vers 1.200°.

FER

La densité du fer solide varie de 7,8 à 8,0; celle du fer liquide est de 6,88. Le coefficient de dilatation linéaire est en moyenne de 0,0000125; à l'état de fil de fer, le même coefficient est de 0,0000144.

Les principales valeurs expérimentales du fer sont les suivantes :

	CHARGE PRATIQUE	CHARGE LIMITE d'élasticité	CHARGE de RUPTURE	COEFFICIENT d'élasticité	ALLONGEMENT proportionnel à la limite d'élasticité
Traction	7,0	14,0	40,0	20.000	0,0007
Compression	7,0	14,0	25,0	20.000	»
Cisaillement	6,0	10,5	35,0	7.500	»

Le fer forgé a une résistance spécifique en microhms-cm égale à 13,78. L'induction spécifique maxima est de 18.251; l'induction spécifique résiduelle est de 7.248. Quant à l'énergie dissipée en ergs par centimètre cube, on la représente par le nombre 13,356. La résistivité a pour valeur 9.693 ohms-cm. La résistance d'un fil de fer de 1 mètre de longueur pesant 1 gramme est de 0,7551 ohm.

Comme tous les métaux, le fer a la faculté de s'altérer lorsqu'il est en contact avec d'autres corps simples ; il s'unit à eux et forme de nouveaux composés ayant l'aspect métallique et jouissant de propriétés physiques spéciales n'ayant qu'un rapport très éloigné avec celles des éléments constitutifs.

Au point de vue de la forme qu'ils affectent, les fers du commerce se distinguent en fers marchands, glacés, feuillards et rubans, larges plats, rails, fers à **I**, à planchers, fers spéciaux (**T**, **U**, cornières, Zorès, tôles).

Le fer le plus pur est celui qui se soude le mieux. Quand la proportion de carbone s'accroît, la soudabilité diminue, mais la dureté augmente.

Le fer pur présente une texture cristalline qui varie suivant la forme qu'on lui donne. La cassure d'un morceau de fer de $0^m,03$ de côté a l'aspect métallique ; la structure est grenue. Quand l'on aperçoit des facettes brillantes, c'est que le fer est mal affiné et cassant. Le fer fibreux est très recherché ; c'est le plus tenace. Un fer de texture grenue a une plus forte densité qu'un fer de texture fibreuse.

Chauffé à l'air libre, le fer se recouvre d'oxydule qui s'écaille en battitures. Si, au contraire, on le chauffe à l'abri de l'air avec du charbon, il se transforme en acier de cémentation.

ACIER

La densité de l'acier est très voisine de celle du fer; elle varie de 7,8 à 7,9. Le coefficient de dilatation linéaire est de 0,0000122 pour l'acier trempé et de 0,0000115 pour l'acier non trempé.

Les principales valeurs expérimentales de l'acier sont les suivantes :

	ACIER CÉMENTÉ	ACIER FONDU	FIL D'ACIER
Charge pratique :			
Traction	13,0	30,0	19,2
Compression	13,0	30,0	»
Cisaillement	10,0	22,0	»
Charge limite d'élasticité :			
Traction	27,0	60,0	»
Cisaillement	20,0	45,0	»
Charge de rupture :			
Traction	75,0	100,0	115,0
Cisaillement	50,0	65,0	»
Coefficient d'élasticité :			
Traction et compression	22.500	27.500	28.000
Cisaillement	8.440	10.312	»
Allongement proportionnel à la limite d'élasticité :			
Traction	0,0012	0,0022	»

La *charge limite d'élasticité* est la charge maxima en kilogrammes par millimètre carré de section que peut supporter un barreau de métal sans éprouver de déformation permanente.

La *charge de rupture* R est la charge maxima en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive que peut supporter un barreau métallique sans se rompre.

Le rapport entre l'effort et l'allongement élastique constant pour un même métal est désigné sous le nom de coefficient d'élasticité.

La formule fondamentale reliant les allongements aux efforts de traction est donnée par la relation :

$$l = \frac{P \times L}{E \times \omega}.$$

dans laquelle l représente l'allongement du fil de longueur L et de section ω soumis à l'expérience ;

P, le poids qui détermine l'allongement ;

E, le coefficient d'élasticité.

La formule précédente s'applique également aux efforts de compression, mais l représente alors le raccourcissement.

L'acier utilisé dans les constructions et dans les ouvrages d'art est l'acier au carbone. Jusqu'ici les aciers spéciaux au nickel, au chrome, au tungstène, au molybdène ont été réservés à des usages particuliers en raison de leur prix de revient plus élevé. D'ailleurs, tels qu'ils sont livrés par l'industrie sidérurgique, les aciers au carbone de bonne fabrication répondent parfaitement à tous les besoins de la pratique des travaux publics.

La définition de l'acier a donné lieu à beaucoup de controverses, mais aucune proposition n'a pu encore, à l'heure actuelle, rallier tous les suffrages. Les opinions suivantes ont été successivement émises pour établir une distinction entre les produits malléables.

1° On désignerait sous le nom d'aciers les produits ferreux malléables ayant une teneur en carbone déterminée et dont le caractère essentiel serait la grande dureté qu'ils seraient susceptibles d'acquérir par la trempe.

Les *fers* seraient des produits ferreux malléables, de moindre teneur en carbone que les précédents, de dureté souvent équivalente à celle d'aciers non trempés, mais dont le durcissement est bien inférieur à celui des aciers, lorsqu'ils sont soumis à la trempe.

La différence entre ces deux définitions est surtout, comme on le voit, d'ordre chimique.

2° On pourrait appeler :

Fer, le composé ferreux, malléable et soudé ;

Acier, le composé ferreux, malléable et fondu.

Dans le premier cas, il y a interposition de scorie entre les grains du métal ; dans le second cas, il n'y a pas de scorie.

3° On comprendrait sous les dénominations suivantes :

Acier, le produit ferreux, malléable, durcissant par la trempe ;

Fer, le produit ferreux, malléable, ne durcissant pas sensiblement par la trempe.

Pour fixer d'une façon plus nette cette délimitation, les Allemands ont décidé de considérer comme *aciers* les métaux offrant une résistance à la traction supérieure à 50 kilogrammes par millimètre carré, et comme *fers* les métaux ayant une résistance inférieure à ce chiffre.

Le Congrès international de Philadelphie a, de plus, divisé ces deux catégories en :

Acier { soudé (Schweiss Stahl, weld steel),
fondu (Fluss Stahl, ingot steel),
Fer { soudé (Schweiss Eisen, weld iron),
fondu (Fluss Eisen, ingot iron).

4° Enfin une dernière proposition consisterait à distinguer ces deux produits en s'arrêtant simplement à la fixation d'un chiffre exprimant, pour chacun d'eux, la résistance en kilogrammes à la traction. C'était revenir à la décision adoptée par l'Allemagne pour ses transactions intérieures.

En présence de ces divergences, MM. Gandillot, Osmond et Pourcel, rapporteurs de la Commission française des méthodes d'essai, ont proposé, comme étant la plus rationnelle, l'adoption de la définition exposée dans le deuxième paragraphe. Il convient toutefois de remarquer que, dans le langage courant, on considère très souvent la trempe comme l'un des facteurs importants caractérisant l'acier.

Le carbone joue, comme on l'a vu, un rôle prépondérant dans la classification des aciers. Il se présente sous les divers états suivants :

Carbone de cémentation. — C'est le carbone du carbure normal du professeur Ledebur. On lui attribue la formule Fe^3C (6,67C + 93,33Fe). On le désigne en métallographie sous le nom de cémentite. Il peut être obtenu, d'après Müller, en traitant l'acier par l'acide sulfurique étendu, à l'abri de l'air. L'attaque dure plusieurs jours. Abel se sert d'un mélange d'acide sulfurique et de bichromate de potassium. Le résidu est formé de silice, de graphite et d'une poudre gris foncé composée de petits grains brillants comme de l'argent et de

dureté intermédiaire entre celle du feldspath et celle du cristal de roche ; il occupe le numéro 6 de l'échelle minéralogique. L'attaque à l'acide sulfurique ou à l'acide chlorhydrique bouillant décompose ce carbone en donnant de l'hydrogène carboné d'une odeur insupportable. On sépare ainsi ce carbone du graphite. Avec l'acide azotique on a un précipité brun floconneux qui se dissout à température élevée.

Carbone de trempe. — Dans l'acier à l'état liquide, tout le carbone se trouve sous forme de carbone de trempe. Au moment de la solidification, le graphite se sépare, puis le carbure normal. Enfin, si la température se maintient longtemps à l'incandescence, une partie du carbone passe à l'état de carbone de recuit. L'attaque à froid, par les acides chlorhydrique et sulfurique étendus, d'un métal contenant du carbonate de trempe, laisse dégager un carbure d'hydrogène très odorant ; le carbone du carbure n'est pas attaqué. L'acide azotique à froid laisse un résidu noir, très différent de celui du carbone du carbure qui est floconneux ; la liqueur s'éclaircit. En Allemagne, on donne à ce carbone le nom de *Haertungskohle*, c'est-à-dire carbone de durcissement, pour cette raison que le fer et l'acier, surtout l'acier à outils, ont leur dureté augmentée par la présence de cet élément.

Carbone de recuit. — Il se comporte à peu près comme le graphite. Il n'est pas attaqué par les acides et se trouve dans le résidu avec le graphite, sous forme de poudre noire. Il se distingue pourtant de celui-ci, car il est amorphe au lieu d'être cristallisé. Il ne subit pas de modification pendant la trempe.

Graphite. — Il est formé de lamelles hexagonales disséminées plus ou moins régulièrement dans la masse. Il est inattaquable par les acides bouillants. Il résulte de la liquation, puisqu'il ne se sépare du métal que pendant la solidification de celui-ci. Il n'existe pas ou n'existe qu'en très faible quantité dans l'acier. Cet élément caractérise plutôt

la fonte grise, qui lui doit d'ailleurs sa couleur. Il convient d'ajouter que certains métallurgistes n'admettent pas la distinction entre le graphite et le carbone de recuit et englobent ces deux états du carbone sous le seul nom de graphite.

Pratiquement, on dose seulement :

Le *carbone combiné*, formé de carbone de cémentation et de carbone de trempe. C'est celui qui se dissout entièrement à chaud dans les acides azotique et chlorhydrique ou dans un mélange de ces deux acides ;

Le *graphite*, insoluble à chaud dans ces acides ;

Le *carbone total*, qui est la réunion des divers états du carbone.

FONTE

Si on l'envisage au point de vue de l'emploi auquel on la destine, la fonte se divise en fonte de moulage et en fonte d'affinage. Si l'on considère seulement l'aspect sous lequel elle se présente, on la distingue en fonte grise, truitée ou blanche.

La fonte grise doit sa couleur au graphite incorporé, mais non combiné dans sa masse. S'il y a peu de graphite, on n'observe qu'une surface mouchetée. La couleur grise ou noire n'est pas une indication absolue de la pureté des fontes. Le silicium y est généralement en proportion notable. On trouve, en outre, un peu de soufre, de phosphore, d'arsenic et parfois des traces de titane. Le carbone s'observe sous deux états différents, une partie sous forme de carbure de fer, l'autre partie sous forme de paillettes noires et très brillantes de graphite. On réduit très difficilement la fonte grise en poudre fine dans un mortier ; on la lime facilement.

La fonte truitée présente à la cassure des mouches presque noires, disséminées avec assez de régularité dans la masse métallique, d'une couleur plus claire que la fonte grise, mais d'une composition chimique sensiblement égale. Elle est fournie par un minerai de bonne qualité et ne contient que de faibles proportions de soufre, de phosphore, d'arsenic, de silicium et de manganèse. La lime l'attaque aisément.

La fonte blanche a un aspect blanc ; elle offre une cassure lamelleuse et miroitante ; elle contient moins de carbone que la fonte truitée. Elle fond vers 1.100° et pèse 7.600 kilogrammes le mètre cube. Quelques fontes blanches lamelleuses ont dans les géodes des cristaux aciculaires à faces nettes et brillantes ; elles proviennent alors de minerais contenant beaucoup d'oxyde de manganèse (fers carbonatés spathiques, minerais magnétiques, hématites brunes). Ce sont des fontes très dures, mais faciles à pulvériser. Les fontes manganésifères sont propres à la fabrication de l'acier.

La fonte blanche grenue n'est pas nécessairement la preuve d'un produit de grande pureté. Le carbone qui s'y trouve est entièrement combiné au fer. Elle contient en quantité variable du silicium, du soufre, du phosphore, de l'arsenic. Elle est en général très dure et cassante et se réduit difficilement en poudre. La fonte blanche fibreuse contient ordinairement une très faible quantité de carbone, mais beaucoup de phosphore, d'arsenic, et souvent du soufre. La texture fibreuse est d'autant plus visible que les proportions d'arsenic et de phosphore sont plus grandes. Cette fonte ne contient pas de graphite. Elle est très dure et cassante et se réduit facilement en poudre.

Le coefficient de dilatation linéaire de la fonte est 0, 0000111.

Les constantes physiques expérimentales de la fonte sont les suivantes :

	CHARGE PRATIQUE	CHARGE LIMITE D'ÉLASTICITÉ	CHARGE DE RUPTURE	COEFFICIENT D'ÉLASTICITÉ	ALLONGEMENT proportionnel à la limite d'élasticité
Traction	2,5	7,5	12,5	10.000	0,00075
Compression	7,0	15,0	75,0	10.000	»
Cisaillement	2,0	5,6	20,0	3.750	»

ANALYSE CHIMIQUE DES COMPOSÉS FERREUX

Nombreuses sont les méthodes qui peuvent être mises en œuvre pour la détermination de la composition chimique des fers, des aciers et des fontes. Les unes, d'exécution rapide, servent surtout au contrôle journalier d'une fabrication. Elles sont malheureusement le plus souvent approximatives, mais l'industriel a intérêt à être renseigné immédiatement et préfère sacrifier la précision à la rapidité d'information. D'autres méthodes, plus délicates, nécessitent un travail long et pénible, mais, par contre, présentent cet avantage de fournir une précision convenant, par exemple, pour la réception de produits devant satisfaire à des conditions déterminées. Dans ce qui suit, on s'est borné à indiquer des méthodes dont l'exactitude a été consacrée par l'expérience.

Carbone. — On dose le carbone sous forme de carbone total, de graphite ou de carbone combiné.

Le carbone total (graphite + carbone combiné) s'obtient en déterminant l'oxydation du métal soit par voie sèche au rouge au moyen de l'oxygène ou du bisulfate de potassium, soit par voie humide au moyen du chlorure mercurique, du chlorure cuivrique ou d'un mélange d'acide sulfurique et d'acide chromique. L'anhydride carbonique formé est recueilli dans une solution potassique ou barytique. Le poids ou le volume qui en résulte est mesuré; du gaz carbonique trouvé, on en déduit la teneur en carbone.

Pour doser le graphite, on dissout le métal dans l'acide chlorhydrique. Le résidu composé de graphite et de silice gélatineuse est recueilli sur un filtre d'amiante, puis traité par une solution chaude de potasse qui dissout la silice et laisse intact le graphite; ce dernier est lavé, chauffé au rouge et pesé.

La détermination du carbone combiné se fait aisément et

rapidement par une méthode suffisamment exacte, connue sous le nom de procédé Eggertz et basée sur l'observation suivante :

Si l'on dissout dans de l'acide azotique étendu du fer ou de l'acier contenant du carbone combiné, celui-ci communique à la solution une coloration brune dont l'intensité est proportionnelle à la quantité de carbone dissous. En comparant cette coloration à celle obtenue dans des conditions identiques avec un fer ou un acier à teneur en carbone connue, on conçoit qu'il est possible de connaître la proportion de carbone cherchée.

Le type choisi pour la comparaison a une teneur en carbone déterminée par une méthode pondérale. L'intensité de la teinte peut être connue par l'emploi d'un colorimètre.

Des modifications de détails qui ont parfois leur importance ont été apportées au procédé primitif imaginé par le chimiste suédois Eggertz. Le mode opératoire suivant est recommandable.

Dans un tube à essai gradué à 10 centimètres cubes, on dissout 2 décigrammes d'acier en limaille dans 3 centimètres cubes d'acide azotique de densité 1,20 (cet acide doit être bien exempt d'acide chlorhydrique). Ce tube est placé dans un bain-marie (*fig.* 114) contenant une couche d'eau de $0^m,04$ à $0^m,05$ de hauteur et dont la température est maintenue constante à 80° C. pendant une durée de deux heures. On l'agite de temps à autre pour redissoudre les particules brunes organiques, peu stables d'ailleurs, qui se sont formées.

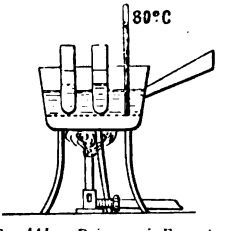

Fig. 114.— Bain-marie Eggertz.

Au bout de ce temps, le dégagement de fines bulles de gaz qui s'étaient produites depuis le début de l'expérience a cessé. La liqueur, trouble à l'origine, est devenue tout à fait limpide; elle est colorée en jaune foncé ou en jaune clair.

Le tube est alors retiré et rapidement refroidi dans l'eau. La liqueur est ensuite étendue d'eau jusqu'au trait marqué

(10 centimètres cubes). Une agitation convenable permet de répartir la teinte uniformément. On compare enfin cette teinte à celle d'un acier à teneur connue en carbone ayant subi exactement les mêmes opérations.

Cette comparaison s'effectue très facilement au moyen du colorimètre Duboscq, qui se compose essentiellement d'un miroir mobile et d'un diffuseur dont les rayons lumineux sont renvoyés à travers deux solutions liquides contenues dans des godets cylindriques en verre. Des prismes plongeurs, également en verre, se meuvent dans le sens vertical à l'aide de vis à crémaillère ; leur déplacement se lit sur une graduation munie d'un vernier. Deux prismes à réflexion totale et un système de lentilles complètent l'appareil (*fig.* 115).

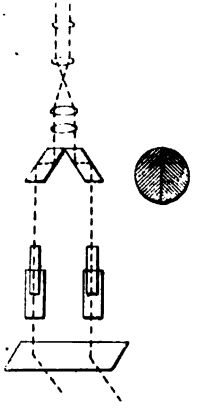

Fig. 115. — Colorimètre Duboscq.

Pour se servir de cet instrument on remplit les godets des deux solutions à comparer, on amène l'une des vis de telle façon que le zéro du vernier corresponde à une division simple, 10 par exemple, l'intensité de la teinte étant jugée convenable. On manœuvre ensuite l'autre vis et par suite le plongeur, jusqu'à ce que la teinte qui se reflète sur un demi-disque soit absolument de même intensité que celle que l'on voit sur l'autre demi-disque accolé au premier.

Si l'on désigne par :

h, le nombre de divisions correspondant à la hauteur de la colonne liquide du type employé ;

h', le nombre de divisions correspondant à la hauteur de la colonne liquide du fer ou de l'acier essayé ;

t, la teneur en carbone pour 100 de l'échantillon-type ;

X, la teneur en carbone pour 100 de l'échantillon essayé, on a la relation :

$$X = t \times \frac{h}{h'}.$$

Exemple :

$$\text{Si } h = 10, \qquad h' = 8, \qquad t = 0{,}500\ 0/0 \text{ de C},$$

on trouve que :

$$X = \frac{0{,}500 \times 10}{8} = 0{,}625\ 0/0.$$

Si l'on ne dispose pas d'un colorimètre, l'essai se fait de la façon suivante :

On opère pour plus de simplicité sur une prise d'échantillon de 1 décigramme.

On emploie des tubes de même calibre divisé en dixièmes de centimètre cube.

On étend la liqueur essayée d'eau distillée jusqu'à l'obtention d'une coloration égale à celle de la liqueur-type ; cette dernière liqueur aura été elle-même étendue d'eau de telle façon que 1 centimètre cube contienne 1 milligramme de carbone.

On peut aussi préparer une échelle de teintes correspondant à des teneurs différentes en carbone, ce qui permet de déterminer immédiatement et sans calcul la teneur cherchée. Dans ce cas les types sont placés par ordre d'intensité croissante devant une glace dépolie qu'il est bon d'orienter vers le nord dans une salle peu éclairée.

Des mixtures diverses ont été proposées dans le but de remplacer la liqueur-type. Ces mélanges doivent être absolument proscrits. Leur emploi ne peut conduire qu'à des résultats erronés. La teinte des solutions se modifiant peu à peu sous l'action de la lumière, il est de toute évidence que l'on doit employer une liqueur qui, elle-même, subit dans des conditions analogues cette transformation. D'ailleurs le type sera choisi parmi un métal de composition chimique sensiblement rapprochée de celle de l'échantillon à essayer.

Le phosphore et le manganèse ont une tendance à produire une teinte plus foncée.

Le soufre et le silicium n'ont aucune influence sur la coloration.

S'il y avait du graphite déposé, il vaudrait mieux filtrer la solution avant de la verser dans le godet du colorimètre.

Le procédé reposant sur la comparaison avec un acier-type, toute erreur de celui-ci entraînera forcément une erreur proportionnelle dans l'observation de l'échantillon à analyser.

Les teneurs en carbone sont trouvées plus faibles avec les aciers trempés qu'avec les mêmes produits recuits.

Cette méthode doit être considérée comme inapplicable à la fonte grise.

Lorsqu'on dispose d'un type connu, le temps nécessaire à cette opération est d'environ deux heures et demie.

Manganèse. — Cette détermination repose sur la réaction suivante : Si, dans une liqueur contenant du manganèse, on projette une petite quantité de minium ou de peroxyde de plomb, il se produit une coloration violette due à la formation d'acide permanganique. Cette teinte est d'autant plus intense que la teneur en manganèse est plus élevée. En établissant la comparaison avec une solution titrée de permanganate de potassium, on peut ainsi connaître la teneur cherchée.

L'opération s'effectue de la façon suivante :

Dans un ballon en verre de 100 centimètres cubes de capacité, contenant 20 centimètres cubes d'acide nitrique de densité 1,20, on dissout 1 gramme de limaille d'acier. L'attaque extrêmement vive se faisant avec dégagement de vapeurs nitreuses abondantes, il est nécessaire d'ajouter la quantité d'acide par petites portions successives. On complète l'attaque en chauffant le ballon de manière à déterminer l'ébullition du liquide.

Après refroidissement, on transvase la liqueur dans un récipient gradué et on complète le volume avec de l'eau distillée, de manière à obtenir 100 centimètres cubes. A l'aide d'une pipette divisée, on prend 20 centimètres cubes de cette liqueur, représentant $0^{gr},2$ d'acier. On verse cette quantité dans un petit ballon jaugé à 50 centimètres cubes. On ajoute 15 cen-

timètres cubes d'acide nitrique pur à 36° B., bien exempt d'acide nitreux. On mélange le tout et l'on porte le ballon sur un bain de sable placé au-dessus d'un fourneau à gaz. On élève la température de manière à atteindre 90° C., ce que l'on obtient facilement en se servant d'une autre fiole de même capacité contenant de l'eau et un thermomètre (*fig.* 116).

On laisse alors tomber dans le liquide environ 1 gramme de minium débarrassé, par une calcination préalable, des matières organiques qu'il peut contenir. Il se produit immédiatement une coloration rouge. On agite le ballon, de manière à répartir le minium dans toute la masse; l'excès de ce sel se dépose au fond du récipient. On maintient trois à quatre minutes cette température et on fait une nouvelle addition de minium. On retire aussitôt le ballon, que l'on refroidit rapidement. On complète le volume à 50 centimètres cubes avec de l'eau distillée. On mélange et on verse le tout sur un filtre en amiante calciné.

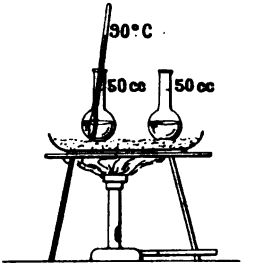

Fig. 116. — Bain de sable. Dosage du manganèse.

La coloration violette du composé permanganique filtré est comparée à celle d'une solution titrée centinormale de permanganate de potassium contenant 1gr,582 de ce sel par litre d'eau. Selon l'intensité de la teinte, il peut y avoir avantage à étendre cette liqueur, au moment de l'emploi, d'une quantité convenable d'eau distillée. Le titre de cette solution est déterminé au moyen de l'acide oxalique par les procédés ordinaires.

La comparaison des teintes se fait avec facilité au moyen d'un colorimètre. Si l'on se sert du colorimètre Duboscq, par exemple, on introduit une petite quantité de la solution de permanganate de potassium dans l'un des godets, et l'on fait varier le prisme plongeur de manière à avoir une couche liquide d'une épaisseur égale à un nombre exact de divisions (1 ou 10 divisions par exemple, suivant que l'on opère avec une solution centinormale ou millinormale). La liqueur à essayer est versée dans l'autre godet; on agit sur le prisme

plongeur correspondant de manière à obtenir l'égalité des teintes. Un calcul très simple donne la teneur en manganèse.

Désignant, en effet, par :

Q, la quantité de manganèse contenue dans 50 centimètres cubes de la solution de permanganate de potassium ;

n, le nombre de divisions lues à l'échelle du colorimètre, la solution-type centinormale correspondant à 1 division ;

N, la teneur pour 100 en manganèse de l'échantillon essayé, $0^{gr},2$ le poids d'acier prélevé, on a la relation :

$$N = \frac{\frac{Q}{n} \times 100}{0^{gr},2}$$

ou :

$$N = \frac{500Q}{n}.$$

Si la solution centinormale de permanganate de potassium contient exactement 0,0276 de manganèse pour 50 centimètres cubes, l'équation précédente devient :

$$N = \frac{13,80}{n}.$$

On peut encore remplacer la liqueur de permanganate titrée par une solution provenant d'un acier-type dont la teneur en manganèse est connue.

En deux heures, on peut ainsi faire l'essai d'une série d'échantillons, à la condition, toutefois, de disposer d'une liqueur titrée préparée.

Phosphore. — Ce métalloïde se dose avec précision en employant la méthode suivante :

On prend 5 grammes de métal que l'on dissout dans l'acide azotique étendu ($d = 1,20$). On évapore à sec. On reprend le résidu par de l'acide chlorhydrique et de l'eau. On sépare la silice par filtration. Dans la liqueur filtrée, on verse de l'ammoniaque. On a un précipité rouge brun volumineux

d'oxyde ferrique dans lequel se trouve la totalité du phosphore. On sèche ce précipité, on le calcine au rouge vif avec du sulfate de sodium. Il se produit une double décomposition avec formation de phosphate de sodium. Ce dernier sel est dissous par de l'eau ; on le sépare du résidu par filtration. Dans la liqueur on ajoute quelques centimètres cubes de la *mixture magnésienne*[1]. On obtient un précipité de phosphate ammoniaco-magnésien que l'on recueille sur un filtre, que l'on calcine et que l'on pèse à l'état de pyrophosphate de magnésium. De ce poids on déduit facilement la teneur en phosphore :

$$P = 0{,}279 P^2O^7Mg^2.$$

Plusieurs jours sont nécessaires pour effectuer ce dosage.

On peut aussi employer la méthode Ad. Carnot, qui consiste à précipiter le phosphore en solution nitrique à l'état de phosphomolybdate d'ammonium au moyen de la liqueur molybdique.

Silicium. — La teneur de cet élément se détermine généralement de cette façon :

Cinq grammes de métal sont dissous, comme précédemment, dans de l'acide azotique étendu. On ajoute un peu de chlorate de potassium pour déterminer l'oxydation complète du silicium, puis on évapore à sec. Le résidu dans lequel se trouve la silice est repris par un peu d'acide chlorhydrique et de l'eau. L'oxyde ferrique et les autres composés se dissolvent. La silice insoluble est recueillie sur un filtre que l'on dessèche et qu'après calcination l'on pèse. Il est alors aisé de calculer la teneur en silicium :

$$Si = 0{,}467 \times SiO^2.$$

1. La mixture magnésienne (mélange magnésien) est ainsi préparée : 83 grammes de sulfate de magnésium cristallisé et 166 grammes de chlorure d'ammonium sont dissous dans l'eau, on ajoute 260 centimètres cubes d'ammoniaque à 22° B. et on étend d'eau de manière à obtenir 1 litre. 1 centimètre cube de cette liqueur précipite $0^{gr},24$ d'anhydride phosphorique.

Soufre. — Un moyen assez rapide de détermination de cet élément consiste à dissoudre dans un flacon une petite quantité de métal au moyen d'acide chlorhydrique. Les gaz dégagés, parmi lesquels se trouve l'hydrogène sulfuré, se rendent dans un tube à boules (*fig.* 117) contenant une solution

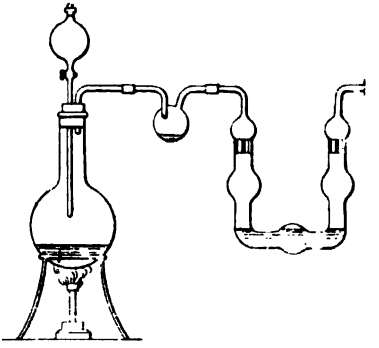

Fig. 117. — Tube à boules. Dosage du soufre.

oxydante, telle que du permanganate de potassium. Il se produit ainsi de l'acide sulfurique que l'on précipite en liqueur chlorhydrique par du chlorure de baryum. Le sulfate de baryum insoluble formé est filtré, calciné et pesé. De ce poids on déduit la teneur en soufre :

$$S = 0{,}137 \times SO^4Ba.$$

Cuivre. — Dans beaucoup de produits sidérurgiques, le cuivre existe à l'état d'impureté ; on ajoute aussi ce métal en vue d'obtenir des produits spéciaux (fontes et aciers). Pour les fontes au cuivre notamment, la teneur en cuivre peut varier de 5 à 10 0/0.

Pour le dosage, on sépare le cuivre sous forme de sulfure que l'on dissout ensuite dans l'acide nitrique. On titre le cuivre par l'iodure de potassium et l'hyposulfite de sodium en liqueur acétique.

A l'analyse chimique proprement dite se rattachent deux ordres de recherches nécessitant l'emploi de réactifs. Ce sont les essais aux acides et l'analyse métallographique.

Essai aux acides. — Il peut être utile, dans certaines circonstances, de connaître la structure intime d'un métal. Les défauts apparents fournissent déjà une indication précieuse sur l'homogénéité d'un échantillon, mais les solutions de continuité très petites, ainsi que la porosité en différents endroits, échappent à l'examen direct. Ces défauts sont mis en évidence par l'essai suivant. Une section plane du métal est polie de manière à faire disparaître les rayures trop accentuées. L'échantillon est ensuite plongé dans un bain acide composé soit d'acide chlorhydrique étendu, soit d'un mélange de 3 parties d'acide chlorhydrique et de 1 partie d'acide azotique, soit encore d'un mélange de 2 parties d'acide azotique pour 1 partie d'acide sulfurique. La durée de l'attaque diffère avec la nature du réactif employé; elle varie de une à douze heures. De temps à autre, on retire du bain la pièce soumise à l'expérience, on la lave à l'eau courante, on la brosse pour la débarrasser du carbone et des matières insolubles et, si l'attaque n'est pas suffisante, on la plonge à nouveau dans la solution acide. Quand l'attaque est jugée convenable, on retire l'échantillon du bain, on le lave et on le fait sécher. Les parties douces et peu carburées sont fortement attaquées; les parties dures le sont faiblement. Les fissures provenant de soudure incomplète, les criques et les soufflures se sont agrandies sous l'action de l'acide. En outre, les grains de scorie se détachent et tombent au fond du vase ou de la capsule, dans laquelle on opère; il est ainsi facile de se rendre compte de leur importance.

Des essais faits suivant ce procédé sur des rails retirés en service ont démontré la différence de structure entre la partie extérieure tendre et la partie intérieure ou noyau, beaucoup plus dure que la première. Une ligne de transition bien marquée est ainsi mise en évidence.

MÉTALLOGRAPHIE MICROSCOPIQUE

Ce procédé d'investigation se répand de plus en plus, car il fournit de précieux renseignements sur la pureté des métaux. Il consiste à examiner au microscope la surface bien polie d'un métal que l'on attaque par un réactif convenable. Cet examen micrographique comporte les opérations suivantes :

La préparation de l'échantillon ;
Le polissage ;
L'attaque proprement dite ;
L'examen au microscope ;
La photographie de l'image ;
L'analyse métallographique.

Préparation de l'échantillon. — L'échantillon que l'on se propose d'examiner ne doit être ni de trop grand ni de trop petit volume. Trop grand, il exige un temps considérable pour le polissage ; trop petit, il est difficilement maniable.

Un cube de 10 à 15 millimètres d'arête, présentant une de ses faces bien dressée, réunit toutes les conditions désirables.

Suivant la nature du métal, cet échantillon pourra être préparé au marteau, à la lime, à la scie américaine, à la fraise, à la meule d'émeri ou par tout autre procédé mécanique. Une de ses faces sera bien plane ; les bords devront être exempts d'aspérités.

Polissage. — Le polissage constitue l'une des opérations délicates de la micrographie. En principe, on doit chercher à arriver à un poli parfait.

Le mode opératoire suivant donne d'excellents résultats :

L'objet tenu avec la main est successivement frotté sur une série de papiers à l'émeri de grosseur décroissante, depuis le numéro 2 jusqu'au numéro 0000. On effectue 200 passes d'une amplitude de 8 à 10 centimètres : 100 passes dans un sens déterminé et les 100 passes suivantes dans un

sens perpendiculaire. Il est ainsi facile de s'assurer de la disparition des précédentes rayures. On continue de la même façon sur le papier portant le numéro suivant.

On termine avec le numéro 0000 en exécutant 400 passes.

Si le numéro 2 primitivement employé était trop fin, on aurait naturellement recours à un papier de grain plus gros.

La durée de cette opération varie de cinq à dix minutes par le seul emploi de la main.

L'objet présente alors une face brillante parsemée de fines rayures.

On continue l'opération en employant soit une rondelle de drap de troupe ou de flanelle collée ou tendue sur une

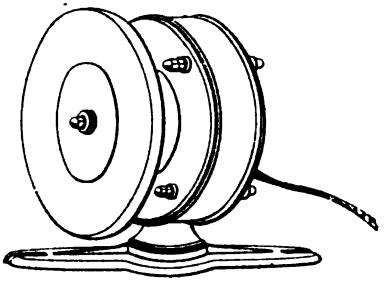

Fig. 118. — Moteur électrique pour le polissage des métaux.

planchette de bois bien plane, soit encore mieux un disque de feutre dit *feutre américain* que l'on saupoudre de rouge d'Angleterre, de rouge à l'or, d'alumine calcinée mélangée avec du savon, d'oxyde de chrome, de potée d'émeri ou de toute autre substance produisant un effet identique.

A l'École des Ponts et Chaussées, on se sert d'un petit moteur électrique (*fig.* 118) qui n'est autre qu'un ventilateur dans lequel on a remplacé les ailettes par un disque métallique sur lequel s'appuie un disque de feutre américain saupoudré d'un des produits ci-dessus indiqués. Un filet d'eau réglable à volonté tombe sur la surface de ce

disque qui est animé d'une vitesse de 1.200 tours à la minute. L'échantillon légèrement pressé sur ce disque se polit complètement dans l'espace de quelques minutes.

Si l'on ne dispose d'aucune installation, on est réduit à se servir de la main ; la durée, dans ce cas, est notablement augmentée.

On s'arrête lorsque l'on constate au microscope la disparition complète de toutes les rayures.

La préparation de la poudre à polir est de grande importance. Il va de soi qu'une poudre trop active, comme le *rouge d'acier* des polisseurs, est trop brutale pour être exclusivement employée. Une poudre trop inerte augmenterait indéfiniment un temps paraissant bien long lorsqu'on opère directement avec la main. Aussi doit-on s'attacher à employer une poudre convenable et homogène ou la préparer soi-même suivant le procédé indiqué par M. Le Chatelier.

Quels que soient le mode et la poudre employés, on peut toujours obtenir une surface bien polie et non rayée. C'est alors que l'on procède à l'attaque proprement dite.

Attaque. — Un grand nombre de réactifs ont été essayés. Certains, comme les acides en général, ont une action très énergique ; d'autres, comme la teinture d'iode, la solution alcoolique d'acide picrique, le réactif de Martens (acide chlorhydrique et alcool), agissent d'une façon plus lente, quelquefois même trop lente. On a expérimenté également des sels tels que le sulfate de cuivre, le chlorure mercurique, le bichromate de potassium, le chlorure d'or, le chloroplatinite de potassium, etc., dont les résultats n'ont pas paru bien satisfaisants.

M. H. Le Chatelier recommande l'emploi des réactifs suivants : solution de 50 0/0 de soude mélangée à une solution de 10 0/0 de nitrate de plomb, dissolution de 10 0/0 d'acide chlorhydrique gazeux dans l'alcool absolu additionné de 5 ou de 1 0/0 de chlorure cuivrique, réactif d'Igewsky (acide picrique en solution dans l'alcool absolu).

D'autres métallographes se servent d'un mélange de picrate de sodium à 25 0/0 avec la soude caustique, de bitartrate de potassium, réactif de Kourbatoff, etc.

On obtient de bons résultats avec l'emploi de la teinture d'iode et surtout de l'acide azotique à divers degrés de dilution.

L'acide azotique à 36° B. est un produit généralement pur. Renfermé dans un flacon bouché à l'émeri, à l'abri de la lumière, il ne subit pas de décomposition appréciable. Il est d'une manipulation facile et se prête avec une extrême commodité à toutes les dilutions nécessaires. Il présente, en outre, cet avantage de pouvoir n'être employé que sur une surface déterminée de la section, ce qui permet par conséquent de faire autant d'attaques qu'il convient sur autant de points différents sans être obligé, par un nouveau polissage, de détruire l'attaque déjà produite si celle-ci était trop forte.

Pour les aciers à faible teneur en carbone, aciers extra-doux et doux par exemple, une attaque à l'acide azotique à 20 0/0 sera généralement satisfaisante. Pour des aciers mi-doux et mi-durs, une attaque avec l'acide à 10 0/0 paraît préférable. Enfin, pour des aciers très durs, une attaque à l'acide à 2 0/0 devient suffisante.

Après l'acide azotique vient la teinture d'iode. Ce réactif donne une image moins heurtée que celle obtenue avec l'acide nitrique. Le seul inconvénient qu'il présente réside dans les colorations diverses observées au microscope. La surface de l'objet s'est souvent recouverte d'une pellicule colorée et il faut, ainsi que le fait remarquer M. Osmond, faire la part des irisations et des colorations obtenues d'un côté par l'attaque et de l'autre par le jeu de lumière. Néanmoins, la teinture d'iode rend de grands services.

Le grand inconvénient des autres réactifs à base d'alcool consiste encore dans ces fâcheuses colorations dont il vient d'être question à propos de la teinture d'iode, et aussi dans une teinte jaunâtre qui subsiste souvent sur certaines parties de la surface examinée au microscope, quand le lavage n'a pas été fait assez rapidement ou quand il a été insuffisant.

L'échantillon subit l'action du réactif pendant une durée très variable, oscillant aux environs de six secondes; c'est la durée moyenne pour les aciers quand on emploie l'acide azotique étendu.

Trois cas se présentent : l'attaque est bonne, elle est trop forte, elle est insuffisante.

Dans le premier cas, le résultat cherché est obtenu. Dans le deuxième cas, il faut recommencer ; rien de plus facile avec l'acide azotique, si l'on a eu soin de laisser indemne une partie de la surface totale. On emploie, cette fois, un acide plus étendu. Dans le troisième cas, si l'on a employé l'acide azotique, il est encore facile de recommencer en augmentant cette fois la durée d'attaque ou le degré de concentration de l'acide.

Si l'on a opéré avec une teinture alcoolique, cette dernière s'est répandue sur toute la surface et y a formé une image. Il faut alors procéder à une nouvelle attaque qui complète l'action de la première, si celle-ci est jugée insuffisante. Il est rare que l'on ait une attaque trop forte par une première application de teinture d'iode.

Dès que l'attaque est reconnue bonne, l'échantillon est porté pendant quelques instants sous un robinet d'où s'écoule un courant d'eau qui enlève l'excès de réactif. L'objet est ensuite pressé sur un papier buvard, ce qui permet d'obtenir un séchage rapide.

Si l'on a affaire à une fonte grise, il est bon, pendant le lavage, de frotter doucement la surface avec un tampon d'ouate, de manière à enlever les particules de graphite qui masqueraient le dessin obtenu.

L'objet est ainsi prêt à être examiné au microscope.

Examen au microscope. — Un bon microscope est indispensable pour l'examen d'un échantillon préparé dans les conditions ci-dessus définies.

Certains microscopes sont spécialement destinés à la microphotographie. Parmi ces instruments on citera particulièrement celui imaginé par M. H. Le Chatelier. Cet appareil se compose d'un système de lentilles et de prismes dont la figure 119 donne un aperçu. Une source lumineuse S envoie ses rayons dans le tube T. Ces rayons traversent une lentille A, le prisme-lentille éclaireur P et l'objectif D, pour arriver à l'objet L placé sur un support B qui repose lui-même sur une monture à vis permettant de faire la mise au point. Un prisme

à réflexion totale E placé sous l'objectif renvoie les rayons lumineux vers l'oculaire H placé dans un tube mobile divisé K. Un diaphragme extérieur C sert à régler l'éclairage ; un autre diaphragme intérieur F empêche l'arrivée des rayons inutiles.

Cet ensemble repose sur un pied évidé P.

Ainsi disposé, cet appareil permet l'examen micrographique

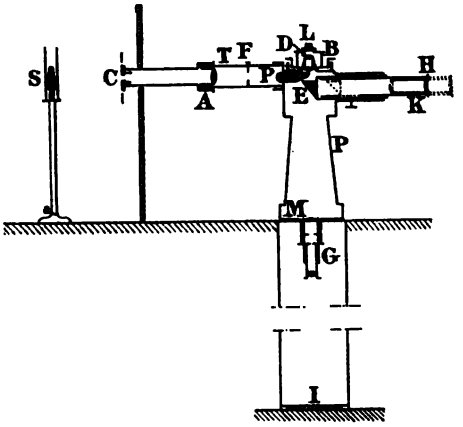

Fig. 119. — Microscope Le Chatelier.

sous des grossissements linéaires de 45 diamètres avec l'objectif 3 et de 150 diamètres avec l'objectif 5.

Ce microscope sert, en outre, à la reproduction de l'image agrandie par la photographie. A cet effet, une chambre noire de 1 mètre de longueur, par exemple, prolonge le pied de l'instrument et reçoit à sa partie inférieure I un châssis contenant une plaque sensible de la dimension 9×12.

On peut obtenir ainsi des grossissements de 75 et de 250 diamètres avec les objectifs nos 3 et 5.

Si l'on interpose à la partie inférieure du pied de l'instrument, en G, un oculaire à projection dont la lentille inférieure est placée à la division zéro, on aura alors des grossissements linéaires de 180 et de 600 diamètres, en employant les objectifs 3 et 5 déjà cités.

On peut également obtenir des photogrammes de 13 et de 45 diamètres en disposant à la partie inférieure du microscope, en M, un châssis contenant de petites plaques : 4 1/2 × 6.

Dans un modèle plus récent construit par M. Pellin

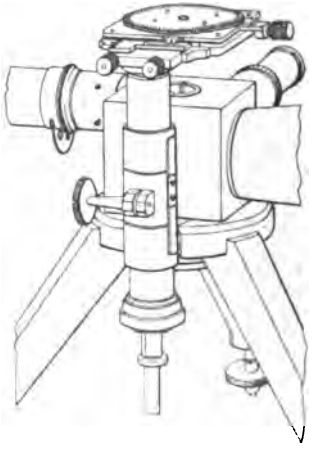

Fig. 120. — Microscope Pellin.

(*fig.* 120), la chambre noire verticale est remplacée par une chambre horizontale ; la platine est montée sur une colonne latérale disposée comme celle des microscopes ordinaires[1].

Comme source lumineuse on emploie indifféremment, mais avec un temps de pose variable, le bec Auer, la flamme d'acétylène, la lumière oxhydrique, l'arc électrique. M. H. Le Chatelier utilise la lumière monochromatique obtenue avec une lampe à arc de mercure dans le vide. M. Osmond se sert de la lumière dégagée par une lampe Nernst à deux gros filaments consommant 1 ampère par filament.

1. Il convient de citer également le microscope portatif imaginé par M. L. Guillet. Cet instrument paraît appelé à rendre de précieux services aux industriels. Il est peu encombrant et donne un grossissement le plus souvent suffisant.

Si l'on considère un acier préparé ainsi qu'il a été dit plus haut, dont l'attaque a été reconnue satisfaisante, et qu'on l'examine au microscope, on apercevra divers constituants auxquels il a été donné des noms particuliers et dont la description a été faite par M. Osmond [1], qui distingue :

1° La *ferrite*, qui est du fer pratiquement pur. La teinture d'iode et l'acide azotique étendu n'ont aucune action sur cet

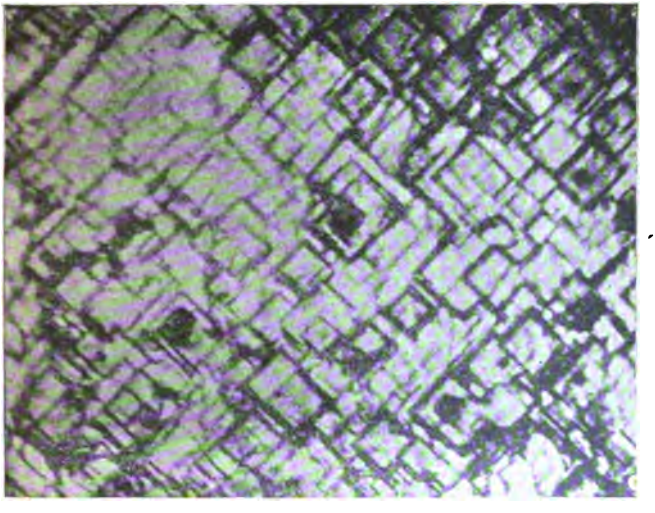

Fig. 121. — Ferrite cubique.

élément, qui reste incolore et conserve par le polissage une surface spéculaire. Sa forme est celle de grains polyédriques appartenant à des cristaux cubiques (*fig.* 121). Les grains sont nettement délimités lorsque la surface de l'échantillon est parallèle à l'une des faces, ou sont plus ou moins confus si cette surface est oblique ou tourmentée.

1. Les photographies montrant les constituants de l'acier ont été obtenues par M. Osmond, qui a bien voulu en autoriser la présente reproduction.

2° La *cémentite*. Ce constituant tire son nom de l'acier de cémentation, où on le rencontre en éléments d'assez grandes dimensions. On lui attribue généralement la formule Fe^3C et on le désigne sous les noms de carbone du carbure normal, carbone de recuit ou carbone de cémentation. La figure 122

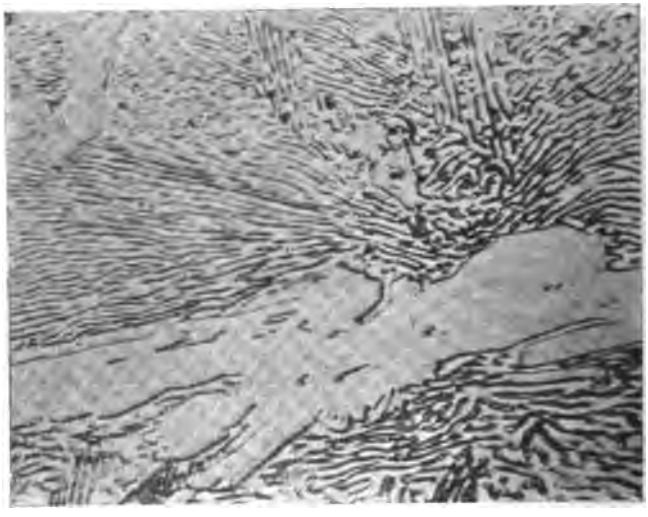

Fig. 122. — Cémentite.

montre l'aspect que présente la cémentite dite indépendante dans un acier de cémentation naturel à 1,50 0/0 de carbone.

Sa forme est assez variable. Elle se présente tantôt sous l'aspect de lamelles plates, souvent curvilignes, mélangées à la ferrite, tantôt sous forme de lamelles rectilignes, de groupes isolés ou reliés en réseau polygonal. Son caractère essentiel consiste dans sa dureté, assimilable à celle du feldspath.

Comparée à la ferrite, elle apparaît en creux, tandis que celle-ci apparaît en relief sur tous les autres constituants. De même que la ferrite, la cémentite n'est pas colorée par la teinture d'iode ni par l'acide azotique. Elle se trouve dans tous les aciers, mais principalement dans les aciers recuits.

3° La *perlite*. C'est un constituant binaire. Elle tire son nom de l'aspect nacré (*pearly constituent*) qu'elle présente en lumière oblique. Elle est formée de fines lamelles parallèles, successivement dures et tendres. Elle est composée, suivant les cas, de ferrite et de cémentite, de cémentite et de sorbite ou encore de sorbite et de ferrite.

Le polissage exécuté avec de l'infusion de réglisse et l'attaque à la teinture d'iode colorent progressivement la

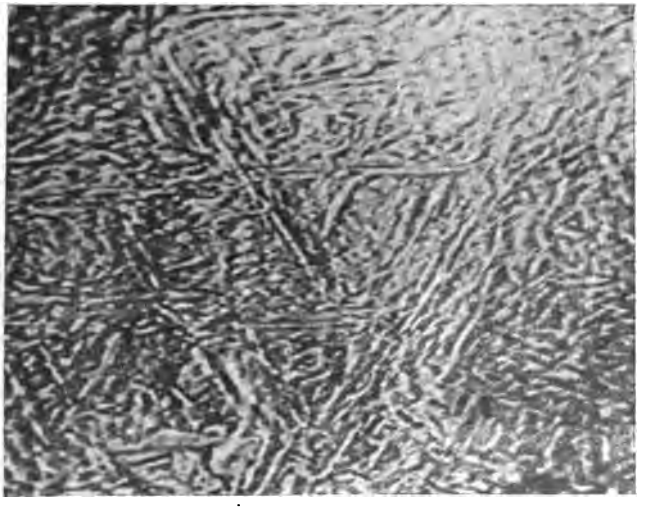

Fig. 123. — Martensite.

sorbite, tandis que la ferrite et la cémentite traitées dans les mêmes conditions restent incolores.

4° La *martensite*. Ce constituant (du nom du professeur allemand Martens), qui paraît faire partie du système cubique, se compose de groupes d'aiguilles qui se recoupent très souvent ou de fibres rectilignes parallèles aux trois côtés d'un triangle.

Le polissage ne le fait guère apparaître. Seule sa dureté, à peu près uniforme, est ainsi mise en évidence.

Généralement, la martensite n'est pas colorée. Une série de deux mille frictions sur le disque de feutre américain imbibé d'infusion de réglisse la colore tout au plus en jaune pâle. Par contre, elle se présente en brun ou en noir par l'attaque à la teinture d'iode.

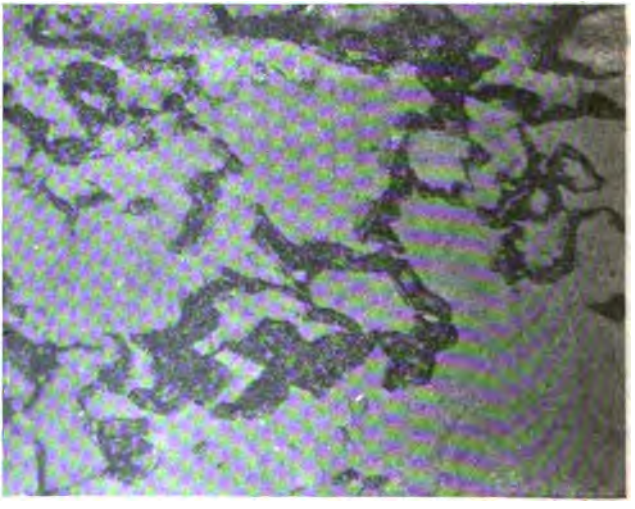

Fig. 124. — Martensite et troostite.

La martensite se distingue de la perlite en ce que les lamelles sont droites et se coupent très souvent entre elles, tandis que dans la perlite les lamelles sont le plus souvent curvilignes et parallèles. La structure de la martensite apparaît nettement sur la figure 123, qui est la reproduction d'un acier forgé à 0,45 0/0 de carbone chauffé à 825° et trempé à 720°.

5° La *troostite*. Ce constituant (du nom du professeur Troost) est une forme de transition entre le fer doux et l'acier trempé. Il se présente sous l'aspect d'un liséré de largeur variable séparant les noyaux de la martensite des lam-

beaux de perlite. Cette bande intermédiaire se teinte des couleurs du revenu : jaune, brun, pourpre, bleu, vert et incolore, en formant des marbrures irrégulières.

Dans la perlite, la troostite se trouve généralement avec la martensite, et la sorbite avec la cémentite.

Les marbrures de la figure 124 sont de la troostite.

Fig. 125. — Austénite et hardénite.

6° L'*austénite*. Cet élément (du nom du savant anglais Roberts-Austen) se présente sous forme de parallélogrammes clairs à bords irréguliers. Il est bien moins dur que la martensite. Il se laisse facilement rayer par une aiguille à coudre dont la pointe a été recuite à la température du revenu. La teinture d'iode le colore. Ce constituant est visible dans la figure 125, qui représente un acier de cémentation à 1,5 0/0 de carbone, chauffé vers 1.050° et trempé dans l'eau glacée.

7° L'*hardénite*. Ce constituant s'observe sous forme de filets barbelés rappelant des fers de lance; ces filets séparent

les parallélogrammes d'austénite. Il forme une solution solide et saturée de carbone dans le fer γ. Il est coloré par la teinture d'iode. Il se voit dans le dessin précédent sous une teinte foncée.

8° La *sorbite*. Elle s'obtient en chauffant de l'acier au-dessus du point critique A_1 et en hâtant le refroidissement sans aller jusqu'à la trempe.

Fig. 126. — Fonte grise.

Photographie de l'image. — Après l'examen au microscope, il peut y avoir intérêt à conserver l'échantillon. On trempe alors celui-ci dans l'huile, le baume, etc., ou bien on vernit sa surface. On préserve ainsi l'objet d'une altération assez rapide. Mais le plus sûr moyen d'avoir une trace durable de l'image observée est d'en tirer une photographie. On sait que l'appareil de M. Le Chatelier remplit ce but.

La surface à photographier et le châssis étant mis en place, on commence par faire une mise au point rigoureuse. On ramène ensuite en arrière le tube oculaire K (Voir la fi-

gure 119) et on ouvré le châssis de manière à découvrir la plaque sensible.

Pour obtenir une bonne photographie, il faut se rappeler que la durée de pose varie avec :

L'intensité de la source lumineuse ;

Le mode d'attaque de l'échantillon ;

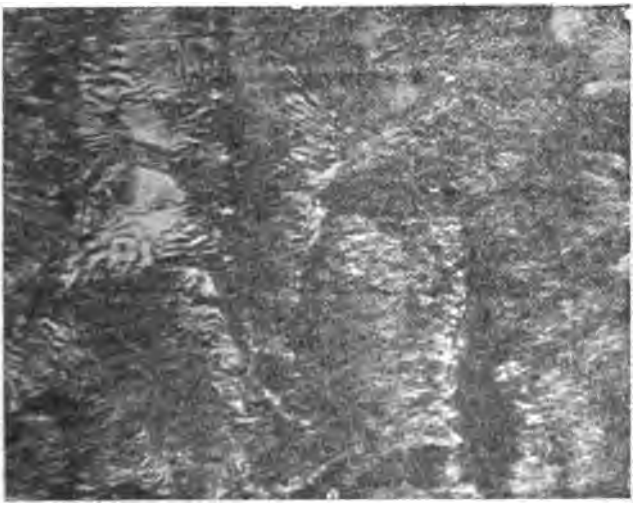

Fig. 127. — Acier à rails.

Le grossissement ;

L'objet employé ;

La sensibilité de la plaque photographique.

A titre de renseignement, on ajoutera qu'en employant un bec Aüer placé à 10 centimètres du diaphragme extérieur du microscope n° 5 et l'oculaire à projection, un échantillon attaqué par l'acide azotique étendu demande vingt à trente minutes de pose pour obtenir un bon cliché au grossissement de 200 diamètres et une à deux heures de pose pour avoir un cliché à 600 diamètres.

Avec la lampe Nernst, le temps de pose varie de deux à cinq minutes. Avec l'arc électrique, une posè de trente secondes à une minute est souvent suffisante.

Les figures 126 et 127 représentent les photogrammes de deux métaux différents.

La première donne la micrographie d'une fonte grise vue sous l'éclairage vertical.

Fig. 128. — Acier dur.

La deuxième est le photogramme d'un acier à rails ayant fourni à l'analyse chimique les résultats suivants :

Carbone combiné	0,389 0/0
Manganèse	0,779
Phosphore	0,100
Silicium	0,069

La figure 128 représente un acier dur.

Analyse métallographique. — Une certaine pratique est nécessaire pour arriver à distinguer du premier coup d'œil

les constituants qui viennent d'être décrits. Pour s'assurer définitivement de l'identité de ces éléments, il est bon de recourir au procédé analytique suivant.

On effectue d'abord l'opération que M. Osmond désigne sous le nom de *polissage en bas-relief*, qui consiste à frotter le métal sur un disque enduit de sulfate de calcium précipité. On obtient ainsi une image dont la figure 129 donne un

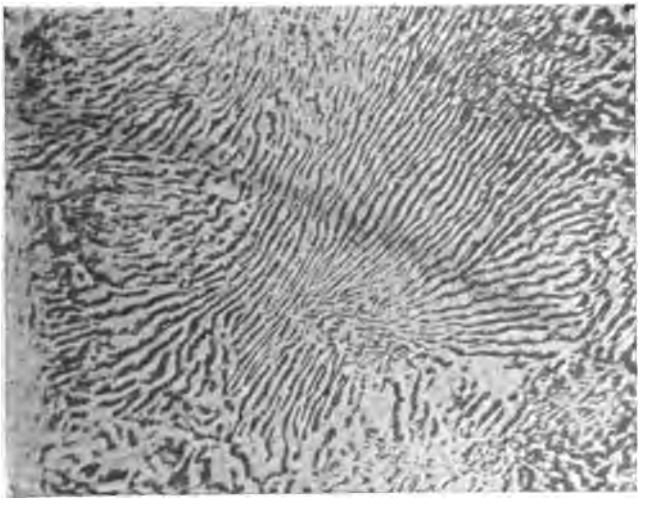

Fig. 129. — Polissage en bas-relief.

exemple. Cette photographie représente un acier à 1 0/0 de carbone, forgé et recuit à 800° (Osmond). Cette opération n'est pas toujours nécessaire.

On passe alors au *polissage-attaque*, qui consiste à frotter l'échantillon sur un disque imbibé d'infusion de racine de réglisse. On a encore un dessin (ex. : *fig.* 130, acier de cémentation). Si le constituant est coloré, c'est de la martensite, de la troostite ou de la sorbite. S'il n'est pas coloré, on a affaire à de la ferrite, de la cémentite, de la martensite ou de l'austénite.

On continue par l'attaque proprement dite faite avec de la

teinture d'iode. Si le constituant est coloré, il appartient au groupe sorbite, troostite, martensite et austénite. S'il n'est pas coloré, ce ne peut être que de la ferrite ou de la cémentite.

Finalement, on a plusieurs groupes de caractères différents, ce qui permet de vérifier l'identité de l'élément.

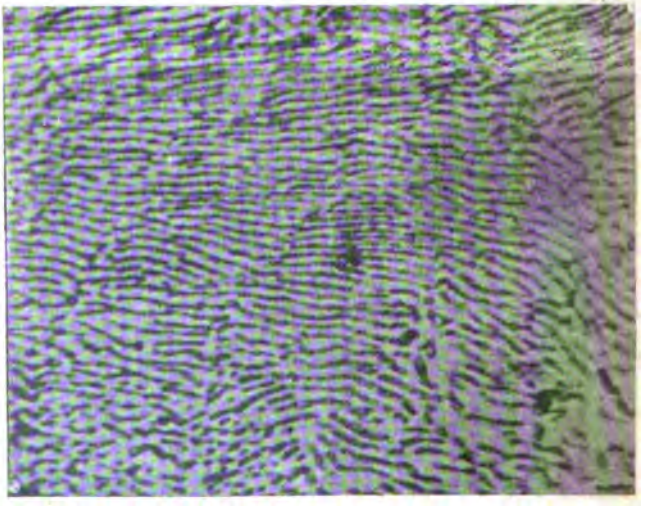

Fig. 130. — Polissage-attaque.

Le tableau suivant résume la marche de cette analyse :

I. POLISSAGE-ATTAQUE (SULFATE DE CALCIUM PRÉCIPITÉ)		II. ATTAQUE A LA TEINTURE D'IODE	
Le constituant est coloré.	Le constituant n'est pas coloré.	Le constituant est coloré.	Le constituant n'est pas coloré.
Martensite. Troostite. Sorbite.	Ferrite. Cémentite. Martensite. Austénite.	Sorbite. Troostite Martensite. Austénite.	Ferrite. Cémentite.

Diagramme de Roozeboom. — Sans entrer dans l'étude approfondie de la métallographie des aciers, on dira néanmoins quelques mots d'un mode représentatif des résultats obtenus par ce procédé. Les variations constatées dans les aciers de diverses natures sont mises en évidence d'une façon très heureuse dans le diagramme du professeur Bakhuis Roozeboom

On sait que, dans ses recherches sur les fers et sur les aciers, M. Osmond a reconnu pour le fer pur trois états allotropiques qu'il a désignés sous les noms respectifs de fer à l'état γ, à l'état β et à l'état α, ou plus simplement de fer γ, fer β et fer α. Ce savant a, de plus, remarqué que le fer pur, porté à la température de fusion, puis refroidi lentement, passait par ces trois états successifs.

Au-dessus de 850°, le fer se trouve à un état particulier, l'état γ. Il cristallise dans le système cubique. Il n'est pas magnétique ; il dissout le carbone.

Quand la température se trouve comprise entre 850° et 740°, le fer γ subit une transformation et passe alors à l'état β. Sous cette forme, il cristallise encore dans le système cubique en présentant des cubes plus ou moins maclés.

Au-dessous de 740°, le fer β se transforme peu à peu en fer α. Si le refroidissement est assez lent, cette transformation est complète à 690°. A cette température précise, le métal se réchauffe et il y a passage immédiat du rouge sombre au rouge vif. Inversement, si l'on porte le même fer à une température successivement croissante en partant de la température ordinaire, on constate qu'à cette même température de 690° il y a ralentissement brusque dans la dilatation, avec accompagnement d'une diminution subite dans l'éclat. Ce double phénomène est celui de la *récalescence*.

On admet, en outre, l'existence de deux autres états du fer, l'un vers 1.380°, désigné sous le nom de point de Ball ; l'autre, d'après Roberts-Austen, vers 600° ou 650°. Ces deux états complémentaires du fer ne sont pas néanmoins nettement définis ; ils n'ont pas reçu de lettres définitives.

Quand on trempe le fer au-dessus de 850°, on obtient du fer γ. Si la trempe a lieu vers 740°, on a du fer β.

Le fer α est magnétique, les fers β et γ ne sont pas magnétiques.

Les points critiques ci-dessus observés sont désignés par les lettres :

A_3	pour la	température	de 850° ;
A_2	—	—	740° ;
A_1	—	—	690°.

S'ils sont obtenus au refroidissement, on les affecte de l'indice *r* ; si, au contraire, on les obtient à l'échauffement, on leur donne l'indice *c*.

Plus loin, on verra que certains aciers ne possèdent qu'un seul point critique. La notation de ce point, dans ce cas, est la suivante :

$$A_{3\cdot 2\cdot 1}.$$

Ces diverses interprétations sont reproduites dans le schéma ci-après (*fig.* 131), qui ne concerne que le fer pur.

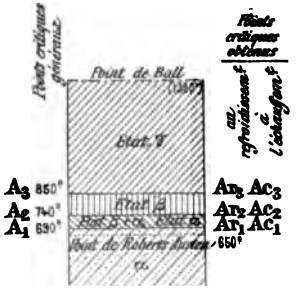

Fig. 131. — Diagramme des points critiques.

Une semblable échelle doit être établie pour chaque nature d'acier.

Acier à 0-0,35 0/0 C. — Soit un acier à teneur en carbone variant de 0 à 0,35 0/0, c'est-à-dire rentrant dans la catégorie des aciers doux (acier extra-doux, très doux, doux, mi-doux). Un pareil acier comprend, comme précédemment, trois points critiques :

Le point	A_3	compris entre	850° et 740° ;
—	A_2	correspondant à	740° ;
—	A_1	—	690°.

Acier à 0,35-0,85 0/0 C. — C'est un acier compris dans la catégorie des aciers durs (acier mi-dur, dur, très dur). Dans un tel acier, il n'y a que deux points critiques : l'un, $A_{3\cdot 2}$, oscillant entre 740° et 690° ; l'autre, A_1, se trouvant à 690°. Le point A_3 proprement dit n'existe pas.

Acier à teneur en carbone supérieure à 0,85 0/0. — Dans ce métal, il n'y a qu'un seul point critique, $A_{3\cdot 2\cdot 1}$, qui se trouve à 690°.

Fontes. — Enfin, pour les fontes, la variation est uniforme jusqu'à la teneur limite de 6,6 0/0.

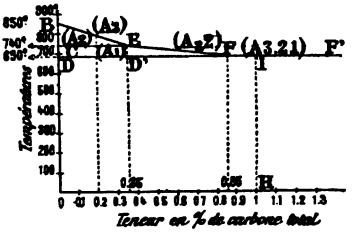

Fig. 132. — Graphique.

Le schéma ci-dessus (*fig.* 132) représente la loi de ces diverses variations.

De l'examen de ce graphique on déduit que :

BE	est le lieu des	points	critiques simples	A_3 ;
CE	—	—	—	A_2 ;
DF	—	—	—	A_1 ;
EF	—	—	doubles	$A_{3\cdot 2}$;
FF'	—	—	triples	$A_{3\cdot 2\cdot 1}$.

Dans l'acier au nickel à 25 0/0 Ni et 0,6 0/0 C, le fer ne subit pas de transformation allotropique. Il existe à l'état γ dans toutes les transformations.

Il en est de même pour certains aciers au manganèse.

Les constituants étudiés jusqu'à ce jour sont les suivants : *ferrite* (ou fer α), *cémentite* (Fe^3C), *sorbite*, *martensite*, *hardénite*, *austénite* et *troostite*.

Le mélange eutectique de la *cémentite* et de la *ferrite* constitue la *perlite*.

Doctrine des phases. — Cette doctrine envisage les transformations allotropiques que subissent les aciers et les fontes sous l'influence de la température. Elle a aussi pour objet de déterminer quelles sont les conditions d'existence, en tant que température, concentration et pression, de chacune des phases solides, liquides et gazeuses relatives à deux ou à plusieurs corps mis en présence. Elle donne enfin l'interprétation des résultats d'expériences.

Le diagramme primitif de Roozeboom, représenté par la

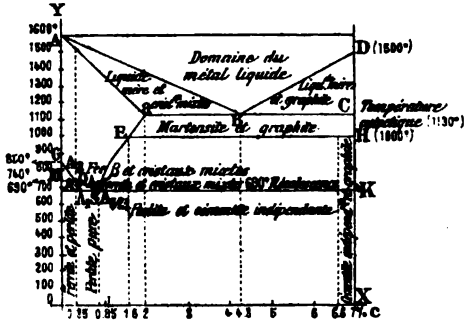

Fig. 133. — Diagramme de Roozeboom.

figure 133, comprend deux axes rectangulaires sur lesquels on porte en abscisses les teneurs en carbone total et en ordonnées les températures correspondantes des divers états allotropiques.

La ligne brisée ABD représente les points de fusion des alliages fer-carbone.

On remarque que le fer pur (C = 0 0/0) est considéré comme ayant sa température de fusion à 1.600°, et que les aciers à teneurs croissantes en carbone ont des températures de fusion uniformément décroissantes jusqu'à 1.130°, qui correspond à un métal de 4,3 0/0 de carbone.

La température remonte ensuite pour atteindre 1.500° avec une teneur de 7 0/0 de carbone.

Si l'on considère un métal à teneur en carbone total inté-

rieure à 4,3 0/0, on s'aperçoit que la partie qui passe en premier lieu à l'état solide consiste en une solution de carbone dans du fer à l'état γ; cette solution est formée de cristaux mixtes.

Dans une fonte à teneur en carbone supérieure à 4,3 0/0, le graphite se dépose en premier lieu, puis le mélange se solidifie complètement à 1.130°. Au-dessous de cette température, l'excédent de 4,3 0/0 de carbone se sépare nettement à l'état de carbone graphitique ou de graphite dit invisible.

Le diagramme montre encore que, pour un métal à teneur inférieure à 0,35 0/0, il y a transformation du fer γ en fer β au point A_3 (triangle GMO), ce que l'on a vu plus haut. Il fait voir aussi la transformation du fer γ en fer α pour un métal à teneur comprise entre 0,35 et 0,85 0/0, chose également observée. Il indique que, pour 0,85 0/0 de carbone, on ne trouve que de la perlite pure, et que, pour un acier encore plus dur (0,85 à 1,60 0/0 C), il y a au-dessous de 690°

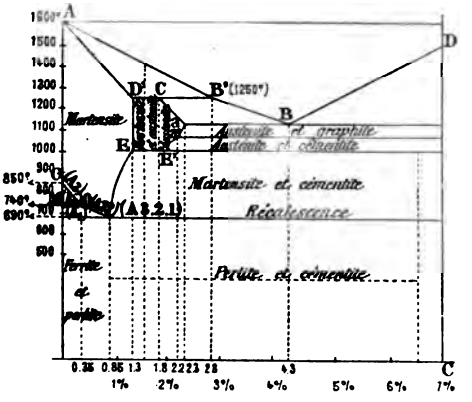

Fig. 134. — Diagramme de Roozeboom complété.

(point $A_{3\cdot2\cdot1}$) une séparation de la cémentite en deux portions, l'une subsistant, l'autre se liquatant. Le fer γ passe à l'état α et l'on a un mélange de perlite et de *cémentite indépendante*.

Pour une teneur en carbone variant de 1,6 à 6,6, on re-

marque que les transformations sont analogues aux précédentes. Entre 1.130° et 1.000°, on a de la martensite et du graphite ; entre 1.000° et 690°, de la martensite et de la cémentite, et au-dessous de 690°, de la perlite et de la cémentite indépendante.

Enfin, pour une teneur supérieure à 6,6 0/0 et inférieure à 7 0/0, on a de 0 à 1.000° de la cémentite indépendante et du graphite.

Les plages, limitées par les lignes de la figure, se nomment *domaines*. Exemple : le quadrilatère EHKS est le domaine du mélange de martensite et de cémentite.

Depuis l'établissement de ce premier diagramme, des constituants nouveaux ou imparfaitement connus ont été découverts ou mieux étudiés. M. Roozeboom a fait rentrer dans son graphique ceux d'entre eux dont l'étude était assez avancée pour qu'on puisse leur assigner la place qu'ils doivent occuper. Il a ainsi établi un nouveau diagramme quelquefois appelé diagramme complété (*fig.* 134).

Ce dernier graphique s'emploie d'ailleurs absolument de la même façon que celui qui vient d'être précédemment décrit.

ESSAIS

Les essais auxquels sont soumis les métaux ferreux sont nombreux et variés. On peut les diviser en deux grandes catégories : les essais physiques et les essais mécaniques. En raison de leur plus grande importance, les essais mécaniques suivants : traction, compression, choc, flexion, torsion, fragilité, essais de fabrication et essais divers, seront d'abord passés en revue.

TRACTION

Les essais de rupture à la traction sont les plus anciennement et les plus communément employés. Comme il est difficile d'opérer sur les pièces elles-mêmes, on est dans

l'obligation de pratiquer ces essais sur de petits barreaux de métal que l'on découpe à froid dans la pièce et auxquels on donne des dimensions déterminées. Ces barreaux sont les

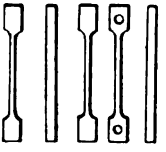

Fig. 135. — Têtes d'éprouvettes.

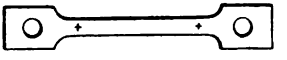

Fig. 136. — Tête d'éprouvette pour tôle.

éprouvettes. Leur forme est souvent celle d'un cylindre terminé par deux têtes cylindriques ou prismatiques (*fig.* 135). Ces têtes doivent autant que possible être repérées sur la tranche, de manière à retrouver facilement sur la pièce elle-même leur provenance et leur position. Deux points marqués à coups de pointeau sur la longueur de l'éprouvette forment des repères qui servent à retrouver cette position initiale de l'éprouvette; ils limitent la longueur utile.

Si l'essai porte sur une tôle, on découpe une éprouvette

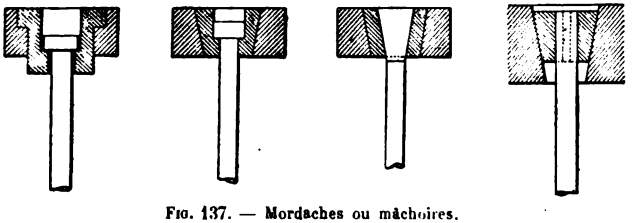

Fig. 137. — Mordaches ou mâchoires.

de même épaisseur en lui donnant le plus souvent une forme indiquée par la figure 136. La largeur et la longueur sont déterminées d'après les usages admis. Un trou percé à chaque extrémité sert à y introduire un boulon faisant partie de l'organe de traction. Parfois on supprime les têtes des éprouvettes qui se réduisent alors simplement à un cylindre ou à un prisme. Les mâchoires ou mordaches affectent les formes indiquées (*fig.* 137).

Les câbles métalliques sont souvent enroulés sur des cosses à gorge ou fixés sur des tambours cannelés (*fig.* 138). Quel que soit son mode d'attache, l'éprouvette doit avoir un jeu suffisant pour lui permettre de s'orienter suivant l'effort de traction ; s'il en est autrement, les résultats sont faussés.

L'allongement total est la somme de l'allongement élas-

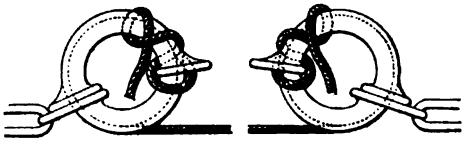

Fig. 138. — Tambours d'enroulement des câbles métalliques.

tique et de l'allongement permanent. Pendant la période élastique, l'éprouvette revient sensiblement à sa position primitive. L'allongement permanent correspond à la période des déformations permanentes. Enfin, le métal s'étire (c'est le phénomène de striction), puis il se rompt. La nouvelle distance entre les repères se mesure en rapprochant le mieux possible les deux parties rompues. On rapporte l'allongement à l'unité de longueur ou à une longueur de cent unités ; c'est l'allongement pour 100, A, qu'on exprime généralement en centièmes de la longueur primitive.

L'essai de traction s'effectue au moyen d'appareils qui dérivent de deux types principaux : les machines à leviers et les machines à manomètres.

Machines à leviers. — Il en existe de plusieurs modèles qui sont basés sur l'un des deux modes opératoires suivants :

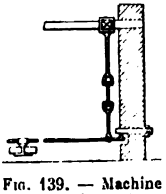

Fig. 139. — Machine à levier simple, à plateau.

a) On ajoute progressivement des poids marqués sur un plateau dont la position est constante par rapport aux leviers.

b) On se sert d'un ou plusieurs leviers sur lesquels on fait mouvoir des poids constants en les éloignant progressivement de leur position initiale suivant le principe de la romaine.

Les principales machines employées sont les machines à levier simple à plateau (*fig.* 139), les romaines à un levier

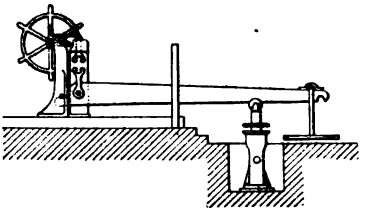

Fig. 140. — Machine Kirkaldy.

(Kirkaldy) (*fig.* 140), les romaines à leviers multiples (*fig.* 141), dont les croquis ci-contre font suffisamment comprendre le fonctionnement.

Avec de pareilles machines il est nécessaire de proportionner le rayon de l'arête des couteaux à l'effort. Les organes doivent revenir d'eux-mêmes exactement à la place qu'ils occupaient avant la mise en charge. Il ne doit pas non plus exister une trop grande différence entre les bras de levier,

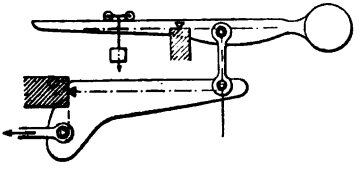

Fig. 141. — Machine à leviers multiples.

afin d'éviter les fortes erreurs qui se produiraient s'il survenait un déplacement dans la position des couteaux.

Aux machines à leviers se rattache la machine Falcot, en usage au laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées et qui est représentée par la figure 142. Le barreau, serré entre deux griffes, transmet l'effort qu'il reçoit à un système de leviers

articulés, qui se trouvent en relation avec une romaine sur laquelle se meuvent des curseurs. L'organe de traction consiste en une vis munie d'un écrou denté qui reçoit son mouvement d'un double train d'engrenages.

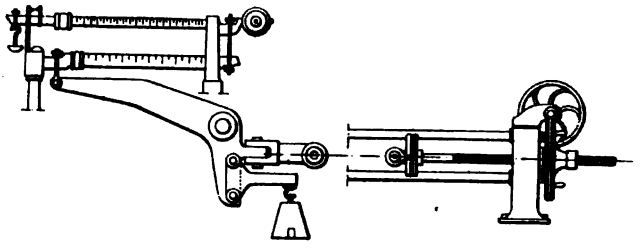

Fig. 142. — Machine Falcot.

Machines à manomètres. — Ces machines dérivent de la presse hydraulique. Elles sont de deux sortes :

a) Le piston se prolonge par une tige de plus petit diamètre passant par le fond du pot de presse.

b) La tête du piston porte un sommet où prennent naissance deux ou quatres bielles entourant le pot de presse et se réunissant sur un second sommier.

Parmi les machines se rattachant au premier système, on citera les machines Thomasset et Maillard. Les principales machines basées sur le second système sont les machines Werder, Kirkaldy, Adamson. Les types Thomasset et Maillard étant les plus répandus seront seuls décrits.

Machine Thomasset. — Dans un corps de pompe (*fig.* 143) arrive de l'eau sous pression qui refoule le piston relié à l'une des extrémités du barreau à essayer B. L'effort supporté par cette éprouvette se transmet à un étrier qui s'appuie à l'aide d'un couteau sur un levier coudé. La pression se transmet par ce levier à une membrane en caoutchouc qui repose sur la surface de l'eau contenue dans la cuvette d'un multiplicateur communiquant avec un réservoir à mercure.

La pression est mesurée au moyen d'un manomètre à air libre.

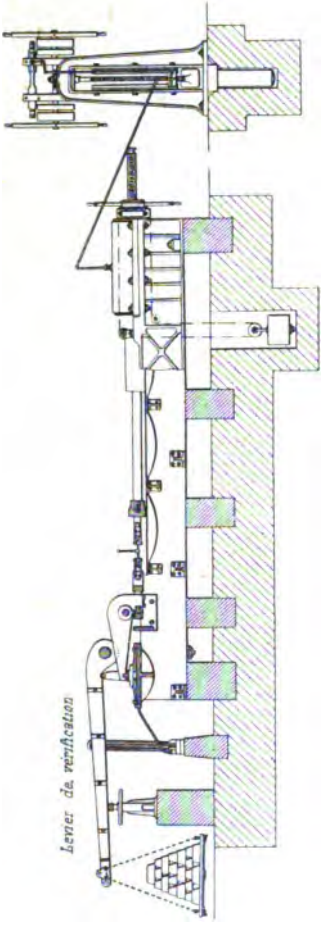

Fig. 143. — Machine Thomasset.

Les conditions d'équilibre de cette machine sont données par les relations :

$$P = Kq = Kp\mathrm{S},$$

dans lesquelles :

P représente l'effort supporté par l'éprouvette ;

K, le rapport des deux bras de levier ;

q, la pression exercée sur le plateau du multiplicateur ;

p, la pression par unité de surface dans la cuvette ;

S, la surface du multiplicateur.

Machine du colonel Maillard. — Dans cette machine (*fig.* 144) deux têtes de l'éprouvette sont maintenues par des mordaches situées aux extrémités des tiges de deux pistons. L'un de ces pistons reçoit la pression d'une presse hydraulique H, l'autre

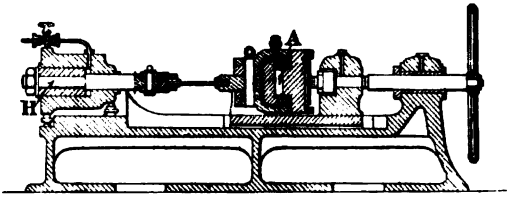

Fig. 144. — Machine du colonel Maillard.

piston comprime par un dispositif spécial l'eau remplissant le corps de pompe A. Le liquide est refoulé dans un manomètre à pistons différentiels qui mesure l'effort produit.

L'équation générale d'équilibre est la suivante :

$$P = qS_1 = p\,\frac{SS_1}{s} = n\left(13^{kg},6\,\frac{SS_1}{s}\right),$$

n étant la colonne mercurielle ;

s, la petite base du piston ;

P, la tension de l'éprouvette ;

S_1, la surface du piston du deuxième corps de pompe sur lequel s'exerce la pression q, les autres lettres ayant les mêmes désignations que celles indiquées ci-dessus pour la machine Thomasset.

On a vu plus haut que l'on mesurait directement sur l'éprouvette l'allongement total.

Pour déterminer les allongements pendant les périodes élastique et de déformation, on a recours à des dispositifs spéciaux. Quelquefois on se sert d'un chariot qui se déplace le long d'une règle parallèle à l'éprouvette. Ce chariot porte deux lunettes avec lesquelles on vise les repères et que l'on déplace pendant l'expérience à l'aide d'une vis et d'une manivelle. On remplace très souvent ce mode, qui a le défaut de nécessiter le concours de plusieurs opérateurs, par un autre qui consiste à se servir d'appareils amplificateurs ou enregistreurs tels que ceux de Rosset, Uchatius, Kennedy, Bauschinger, Wickstead, Godmann, Unwin, etc. Les enregistreurs permettent de suivre la marche du phénomène. La courbe qui est tracée donne des abscisses proportionnelles aux allongements et des ordonnées proportionnelles aux charges ou inversement.

L'élasticimètre Klein enregistre la loi de déformation dans la période élastique ; l'élasticimètre Neel et Clermont inscrit des longueurs proportionnelles aux allongements de l'éprouvette sous les efforts successifs.

COMPRESSION

Les essais de compression ne sont pas des essais usuels. Aussi les machines destinées à ces essais sont-elles le plus souvent des machines de traction à effet réversible.

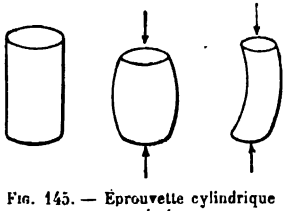

Fig. 145. — Éprouvette cylindrique comprimée.

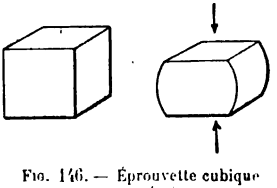

Fig. 146. — Éprouvette cubique comprimée.

Les éprouvettes que l'on emploie ont la forme de cylindres ou de prismes droits sur les bases desquels on exerce les efforts.

Si une éprouvette cylindrique (*fig.* 145) est de longueur convenable, la compression lui fait prendre la forme d'un tonneau. Si elle est trop longue par rapport à son diamètre, elle se courbe (flambement). Une éprouvette cubique se déforme comme l'indique la figure 146. On admet généralement qu'une éprouvette qui doit être soumise à un effort de compression doit avoir une longueur inférieure à deux fois la plus petite dimension transversale.

Comme dans le cas de la traction, il y a une limite élastique correspondant à un raccourcissement élastique et une période de déformation permanente correspondant à un raccourcissement permanent. De même aussi que pour la traction, on mesure les efforts en les rapportant à la section primitive.

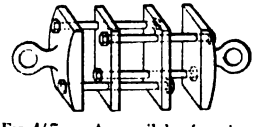

Fig. 147. — Appareil de réversion.

L'appareil de réversion que l'on emploie quand on se sert d'une machine de traction peut revêtir la forme indiquée par la figure 147. Il se compose alors de deux sommiers reliés par des tirants avec les points d'attache de la machine. Il en existe encore un autre modèle appelé *mordaches croisées*.

Les machines d'essais de compression directe étant assez peu répandues ne seront pas décrites.

Quelles que soient les machines employées pour les essais de traction ou de compression, il est indispensable d'en effectuer le tarage. Cette opération se fait soit en brisant des éprouvettes identiques avec une machine connue et tarée, soit en mesurant une série de déformations élastiques que l'on compare aux déformations analogues produites par une machine servant d'étalon, soit encore en observant et en mesurant successivement sur la machine à essayer et sur la machine-type la limite élastique d'une même éprouvette. Il va sans dire que les deux conditions d'équilibre des balances, justesse et sensibilité, s'appliquent également à ces machines.

CHOC

Les essais de choc ont pour but de déterminer la ténacité d'un métal ou l'aptitude qu'il présente à résister à des chocs violents.

Ces essais s'exécutent de différentes manières. On laisse tomber, par exemple, un mouton d'un poids et d'une hauteur déterminée sur une pièce reposant librement sur deux appuis. On peut aussi faire ployer l'éprouvette sous le choc produit par la chute d'un mouton et répéter cette expérience jusqu'à la rupture en retournant ou non l'éprouvette sur elle-même après chaque chute.

On emploie souvent des barreaux prismatiques de section carrée de 20 centimètres de longueur et de 16 centimètres d'écartement entre les couteaux d'appui (*fig.* 148). Le côté de la section carrée est de 4 centimètres quand le barreau est en fonte et de 3 centimètres pour les autres métaux.

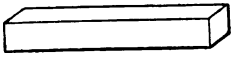

Fig. 148. — Barreau prismatique à section carrée.

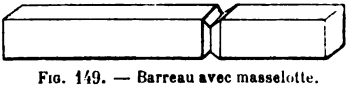

Fig. 149. — Barreau avec masselotte.

Lorsque cela est possible, on coule le métal dans un moule ayant la forme que doit avoir l'éprouvette. Pour la fonte, on a soin de ménager à la partie supérieure une masselotte que l'on détache à coups de marteau après refroidissement (*fig.* 149).

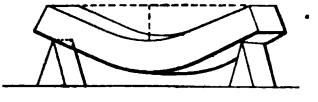

Fig. 150. — Flèche provoquée par la chute d'un mouton.

L'essai au choc doit donner les indications suivantes : hauteur de chute du mouton, nombre de coups que supporte le barreau sans se rompre (*fig.* 150) et autant que possible flèche que prend l'éprouvette après un certain nombre de coups de mouton.

Le mouton employé peut être indifféremment en fonte ou en acier fondu, mais sa panne doit être indéformable (acier dur trempé, par exemple).

L'appareil de choc affecte diverses formes. La figure 151 montre le schéma d'un mouton sphérique à chute libre. L'un

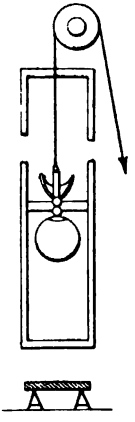

Fig. 151. — Mouton sphérique à chute libre.

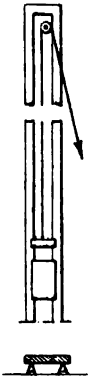

Fig. 152. — Mouton guidé.

des montants en charpente soutient un appareil élévatoire mis en mouvement par un treuil à bras ou un treuil mécanique à déclic.

Le mouton guidé (*fig.* 152), préférable au système précédent, descend le long de glissières. On le laisse tomber soit d'une hauteur constante, soit de hauteurs variables, mais croissantes.

Si l'on désigne par P le poids du mouton et par H la hauteur de chute, le travail produit sera représenté par :

$$T = P \times H.$$

FLEXION

L'essai de flexion mesure la résistance transversale sous un effort continu. Son importance est très grande lorsqu'on veut se rendre compte de la résistance de certaines pièces

finies telles que rails, ressorts, essieux, bandages de roues, etc. Cet essai se fait aussi sur des éprouvettes.

Pour les fontes, on emploie très souvent l'appareil Monge (*fig.* 153), dans lequel le barreau prismatique s'appuie sur deux couteaux espacés et opposés. L'une des extrémités

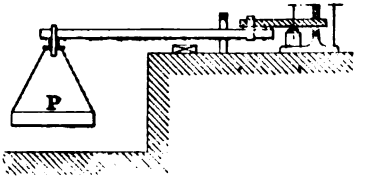

Fig. 153. — Appareil Monge pour la flexion.

de ce barreau est reliée par une bride et une cale à un levier d'une longueur de $2^{m},83$. La partie extrême de ce levier soutient un plateau que l'on charge progressivement de poids marqués. Le barreau fléchit autour du couteau le plus rapproché du levier, puis se rompt.

Une autre machine, la romaine équilibrée de Joëssel, sert également à l'essai de flexion ; elle permet de lire les flèches prises par le barreau d'épreuve sous des charges variables et progressives.

Aux essais de flexion se rattachent les essais de pliage et de cintrage avec lesquels on apprécie la ductilité des aciers.

L'essai de pliage s'effectue au moyen d'un étau de forme particulière, de la presse, du marteau ou encore de machines de traction ou de compression auxquelles on adjoint un dispositif approprié.

La figure 154 représente une disposition qui peut être adoptée. On mesure l'angle ABC de la barrette pliée.

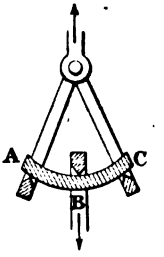

Fig. 154. — Essai de flexion.

Dans l'essai de cintrage, on détermine le rayon de courbure r de la partie que l'on a ployée autour d'un mandrin. Les essais de flexion sur pièces finies s'appliquent surtout aux rails et aux ressorts.

Les machines Marié et Thomasset sont des machines agencées pour mesurer la flexion des rails. Elles sont robustes, s'adaptent aux conditions de déplacement de masses pesantes et sont munies d'appareils enregistreurs.

Dans la machine Marié (*fig.* 155), le milieu du rail est placé sur un couteau fixé au fond d'une encoche. Ce couteau repose sur la partie supérieure du piston d'une presse hydraulique. Deux autres couteaux symétriques et opposés au premier

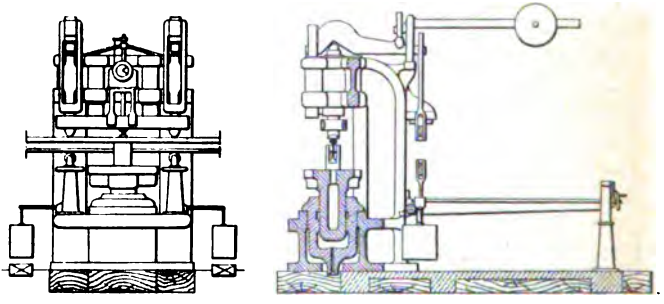

Fig. 155. — Machine Marié.

servent de points d'appui au rail. Le rail reçoit la pression que lui transmet le piston de la presse au moment de la charge, ce qui détermine une flexion que mesure une lame flexible munie d'une aiguille indicatrice se déplaçant sur un cadran gradué.

La machine Thomasset, moins répandue que la précédente en ce qui concerne les essais de flexion, donne également de bons résultats.

TORSION

L'essai de torsion s'applique surtout à la réception de fils métalliques. Il rentre plutôt dans le domaine théorique que dans la pratique courante. Il s'exécute le plus souvent à la main. Une extrémité de l'éprouvette est placée dans un étau fixe, l'autre extrémité est serrée dans une mâchoire mobile à laquelle on imprime un mouvement de rotation.

FRAGILITÉ

Il est utile, dans certains cas, de se rendre compte du degré de fragilité des métaux, c'est-à-dire de la facilité plus ou moins grande avec laquelle ils se brisent sous l'effet d'un faible choc. C'est le but que l'on se propose dans l'essai au choc des barreaux entaillés.

Pour effectuer cet essai, on prend un barreau de métal de longueur convenable que l'on entaille sur sa surface en divers endroits également espacés. Ce barreau est placé dans un étau de manière que l'extrémité qui doit recevoir le choc du mouton se trouve à l'aplomb de la paroi extérieure (*fig.* 156). On laisse tomber le mouton sur cette extrémité. La rupture doit se produire sous l'effet d'une seule chute du mouton. Il en résulte qu'il faut, au préalable, faire subir au barreau une succession de chocs en détachant chaque fois le tronçon essayé tant qu'il n'y a pas rupture et en augmentant chaque fois la hauteur de chute.

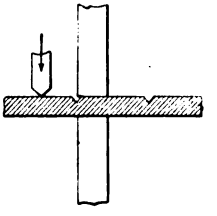

Fig. 156. — Barreau entaillé. Essai de fragilité.

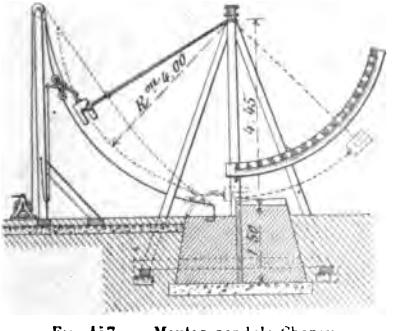

Fig. 157. — Mouton-pendule Charpy.

Les appareils employés à cet effet sont de deux types : les moutons-pendules (Charpy, Russell) et les moutons

ordinaires (Frémont, Barba, Le Blant, Le Chatelier).

On se contentera de décrire le mouton-pendule Charpy. Cet appareil se compose d'un mouton métallique suspendu au sommet d'un triangle et se déplaçant dans un plan vertical en décrivant un arc de cercle (*fig.* 157). Le barreau est placé sur deux supports et s'appuie contre une plaque métallique. Cette plaque est fixée à la fois dans le sol et sur un massif de maçonnerie. Un arc de cercle gradué est disposé sur l'un des côtés du portique : un autre arc placé à la suite du premier sert à accrocher le mouton à des hauteurs variables.

Le travail absorbé par la rupture est le produit du poids du mouton par la différence des hauteurs de départ et d'arrivée du mouton.

M. Charpy appelle *résilence* la résistance vive à la rupture d'une tranche mince de métal.

Un autre appareil destiné également à mesurer la fragilité a été imaginé par M. Frémont.

Ces sortes d'essais ne font pas l'objet de prescriptions dans les cahiers des charges ordinaires. D'ailleurs la question ne paraît pas complètement résolue, puisque l'on constate une discontinuité dans les résultats obtenus. Aussi n'insistera-t-on pas davantage sur ces essais, dont l'étude a besoin d'être poursuivie.

ESSAIS DE FABRICATION

Ces essais sont les suivants :

Essais de façonnage à froid. — Ce sont les essais d'élargissement au mandrin, d'emboutissage, d'aplatissement, d'écrasement. On trouvera plus loin leurs conditions d'exécution.

Essais de façonnage à chaud. — Ils ne se pratiquent guère que sur des fers et des aciers misés obtenus par puddlage. L'inconvénient qu'ils présentent consiste surtout en ce que le résultat dépend de l'habileté de l'opérateur. Comme il est

d'usage de les employer dans la pratique des ateliers, on les passera successivement en revue.

Essai des crochets. — Un fragment de métal est prélevé sur la pièce à éprouver. On le forge en une barre ronde dont le diamètre est de 20 millimètres pour le fer et de 16 millimètres pour l'acier. Cette barre est chauffée au rouge sur une longueur de $0^m,50$; on la plie à coups de marteau sur un étau de manière à lui faire prendre un angle de 90° (*fig.* 158); on la redresse et on répète plusieurs fois la même expérience. On peut même aller jusqu'à la rupture. Il est important de ne pas réchauffer le métal pendant l'opération.

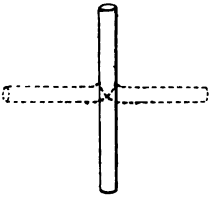

Fig. 158. — Essai des crochets.

Essai de pliage. — Cet essai s'applique surtout à la tôle.

Fig. 159. — Essai de pliage.

Fig. 160. — Essai de pliage.

Suivant la qualité du métal, on forme une cuvette (*fig.* 159),

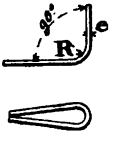

Fig. 161. — Essai de pliage.

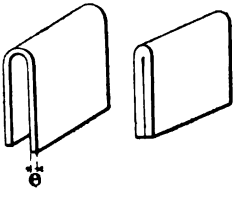

Fig. 162. — Essai de pliage.

une calotte sphérique (*fig.* 160) ou un cylindre (*fig.* 161). Les rayons du pliage diffèrent suivant l'épaisseur des tôles (*fig.* 162).

On fait encore l'essai du double pliage dans un fragment de tôle, ayant un côté égal à vingt fois son épaisseur, que l'on plie à bloc une première fois, puis une seconde fois sur lui-même (*fig.* 163). Il ne doit pas y avoir de criques ni de gerçures.

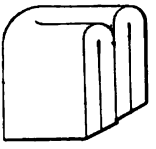

Fig. 163.
Essai de pliage.

Essai de soudabilité. — Il se fait en soudant deux morceaux de barres différentes ou d'une même barre. En perçant ou en tordant le métal comme il a déjà été indiqué, on ne doit constater aucune dessoudure.

Essai de perçage, essai de rabattement. — On chauffe au rouge cerise très clair (blanc de lune) le métal misé que l'on a amené sous forme de barrettes. Selon la largeur qu'on lui a donnée, on fait une ou deux entailles avec une tranche.

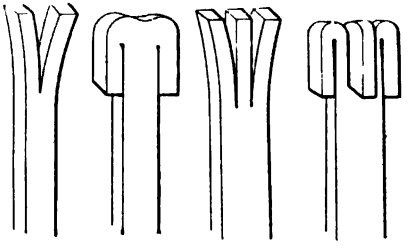

Fig. 164. — Essai de rabattement à chaud.

On rabat de chaque côté de la barre les deux lames extrêmes. Le métal ne doit présenter aucune déchirure (*fig.* 164).

Pour les fers supérieurs on fait l'expérience en une seule chaude. Pour les fers de qualité moyenne on exécute l'essai en deux chaudes.

En ce qui concerne les perçages avec rabattement, la barre étant portée au rouge cerise très clair, on perce avec un poinçon un ou deux trous, puis, au rouge sombre, on plie la

barre à bloc comme l'indiquent les figures (*fig.* 165). Il ne doit pas se produire de déchirure du métal.

Par ce qui précède, on voit combien sont nombreuses les machines servant aux essais; encore n'a-t-on décrit que les principales d'entre elles.

Pour comparer entre eux les résultats obtenus avec ces machines, on comprend facilement qu'il est indispensable de

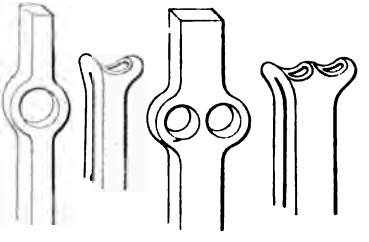

Fig. 165. — Essai de perçage.

coordonner les méthodes employées et d'adopter des règles uniformes afin d'opérer d'une façon absolument identique. Ce sont les raisons pour lesquelles ont été adoptées les conclusions contenues dans le rapport général de MM. L. Baclé et P. Debray et dont les parties essentielles sont reproduites ci-après [1].

1. Dans cette reproduction, on a conservé les conclusions relatives aux essais du cuivre et de ses alliages.

PRATIQUE DES ESSAIS DES MÉTAUX

PREMIÈRE PARTIE

ESSAIS PHYSIQUES

CHAPITRE I

EXAMEN PHYSIQUE

Observation, sans appareils spéciaux, de l'aspect extérieur et des cassures. — 1° L'observation de l'aspect extérieur des pièces avant tout essai peut, quand elle est faite par un praticien exercé, donner une appréciation éclairée de la qualité des métaux et alliages; elle ne doit pas être négligée. Elle ne comporte pas de règles d'unification.

2° Les cassures d'éprouvettes (*fig.* 166) rompues à la traction sont distinguées d'après la classification suivante qui paraît applicable à la plupart des métaux coulés et forgés :

A. Cassure en forme de coupelle, à lèvres lisses et brillantes, à contours très nets, fond gris terne.

B. Mêmes formes générales que *A*, mais un peu embrouillées.

C. Cassure plane, normale à l'axe. Un anneau de grains brillants entoure une partie grise et terne.

D. Cassure rappelant celle du bois pourri, caractérisée généralement par des lignes parallèles à l'axe longitudinal de la pièce, appelées « travers ».

F. Cassure en sifflet ; surface oblique, lisse et brillante.

G. Cassure formée par plusieurs sifflets séparés par des parties brillantes, « pailles » ou « soufflures ». Ces parties,

comme les « travers » de la cassure *D*, sont toujours parallèles à l'axe longitudinal de la pièce.

G'. Cassure analogue à *G*, mais avec un plus grand nombre de défauts.

H. Cassure plane, normale à l'axe, à grains brillants traversés par une paille ; *Hn*, quand la paille est noire.

I. Cassure plane, normale à l'axe, à grains fins.

K. Cassure plane, normale à l'axe, à gros grains brillants.

3° Les fontes sont distinguées, en outre, d'après les caractères organoleptiques suivants : fonte grise, blanche ou truitée ; on vérifie d'autre part si la fonte est facile à limer, buriner, tarauder ou tourner ; on note le nombre de fusions, et, s'il y a lieu, les procédés de fusion.

4° Pour les laitons, on distingue l'aspect final du barreau après étirage, d'après la classification suivante :

α. Aspect sensiblement le même qu'avant l'essai de traction.

β. Granulation à peine apparente.

γ. Granulation sensible.

δ. Surface très moutonnée.

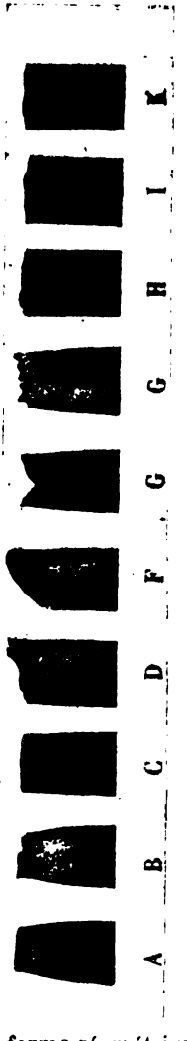

FIG. 166. — Cassures d'éprouvettes.

CHAPITRE II

DÉTERMINATION DE CERTAINES CONSTANTES PHYSIQUES

Détermination de la densité. — *a*) *Eprouvettes.* — 1° L'échantillon employé affecte, autant que possible, une forme géométrique simple : cube, parallélipipède, cylindre, etc. Dans tous les

cas, on évite absolument de lui donner des faces rentrantes.

2° Il a un poids minimum de 30 grammes, le maximum étant limité par la force de la balance hydrostatique dont on dispose.

3° Les faces sont toujours parfaitement dressées et polies, sans taches d'oxydes ou de corps gras.

4° On laisse séjourner pendant quelques heures, dans la salle de la balance, l'échantillon et le vase contenant l'eau.

5° Pour faire la pesée dans l'eau, on suspend l'échantillon au moyen d'un fil de cuivre fin.

6° On tient compte de la perte de poids du fil dans l'eau.

7° Il n'est généralement utile de faire la correction due à l'influence de la température de l'eau qu'autant qu'elle dépasse 10° C.

8° On exécute les mesures sur cinq échantillons, et on prend la moyenne des résultats obtenus.

b) *Pièces finies.* — 1° On ne détermine le volume de la pièce en opérant sur la pièce elle-même qu'autant que la pièce ne présente pas une surface rugueuse ni des soufflures apparentes.

2° Dans le cas contraire, on détermine le volume de la pièce en se servant soit du modèle, et tenant compte du retrait si cela paraît nécessaire, soit d'une pièce de formes identiques.

3° On emploie, autant que possible, pour suspendre la pièce, un fil de fer ou de cuivre assez fin, et plongeant assez peu pour qu'il n'y ait pas lieu de faire la correction y relative.

4° Il n'est généralement utile de faire les corrections relatives à la température de l'eau qu'autant qu'elle dépasse 10° C.

CHAPITRE III

ÉTUDE PHYSIQUE DES VARIATIONS D'ÉTAT DES MÉTAUX SOUS L'INFLUENCE DES CHANGEMENTS DE TEMPÉRATURE

Détermination des températures critiques par la méthode du refroidissement. — Il y a lieu de s'attacher à la détermination des températures critiques par la méthode du refroidissement, car elle constitue, pour certains métaux, un essai de grand intérêt susceptible de recevoir des applications importantes dans l'avenir.

Variation de la conductibilité électrique. — Les essais de conductibilité électrique pratiqués sur un même métal à différentes températures complètent les études opérées par la méthode du refroidissement; ils servent à préciser les variations d'état du métal, et notamment la position des points critiques.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DE LA TREMPE

En ce qui concerne spécialement les aciers doux, les barreaux destinés à être soumis à des essais mécaniques après trempe sont chauffés uniformément de manière à être amenés au rouge cerise un peu sombre (700° environ) ; ils sont ensuite trempés dans un volume d'eau à 28° très grand par rapport au volume des barreaux.

DEUXIÈME PARTIE

ESSAIS CHIMIQUES

CHAPITRE I

ANALYSE DES MÉTAUX ET ALLIAGES

1° L'analyse chimique pratiquée sur échantillons convenablement choisis apporte des renseignements très intéressants même au point de vue de l'appréciation des propriétés mécaniques des divers métaux et alliages. Il conviendrait, pour obtenir des résultats comparables, d'effectuer cette analyse d'après des règles uniformes[1].

2° Pour les cuivres et leurs alliages, il y a lieu de signaler spécialement la méthode électrolytique, à cause de sa facilité d'emploi[2].

CHAPITRE II

ESSAIS DE CORROSION ET D'ADHÉRENCE DES REVÊTEMENTS PROTECTEURS

Dans les essais de fils, l'adhérence des revêtements protecteurs est constatée par une épreuve d'enroulement et de déroulement qui est exécutée dans les conditions spécifiées plus loin pour l'épreuve mécanique.

Pour apprécier l'épaisseur de la couche du métal protecteur, notamment du zinc sur les fils galvanisés, on opère au moyen d'immersions successives de une minute chacune dans une dissolution composée de : 1 partie de sulfate de cuivre pur cristallisé pour 5 parties d'eau distillée.

Le fil est, avant la première immersion, dégraissé par lavage dans une dissolution faible de potasse; entre chaque immersion, il est essuyé avec un chiffon doux, sec et propre.

1. L'analyse des fontes, aciers et fers faite suivant les procédés indiqués dans le cours de l'ouvrage fournit d'excellents résultats.
2. Voir chap. XXV, *Cuivre, Alliages de Cuivre.*

TROISIÈME PARTIE

ESSAIS MÉCANIQUES

RECOMMANDATIONS COMMUNES A TOUTES LES MÉTHODES D'ESSAI

CHAPITRE I

OBSERVATIONS GÉNÉRALES

1° Il faut observer que les renseignements fournis par les essais mécaniques, surtout sur éprouvettes détachées des produits de qualité ordinaire, ne constituent souvent que des indications approximatives pouvant comporter des écarts sensibles sur une même pièce. Ces écarts sont plus ou moins grands suivant la nature des pièces éprouvées et les soins apportés à leur exécution.

2° Pour obtenir une appréciation plus complète de la qualité du métal, il convient fréquemment d'accompagner l'épreuve mécanique spéciale, de quelque nature qu'elle soit, d'un essai de traction.

3° Il ne faut pas abuser toutefois des essais de traction, qui exigent un travail souvent assez long pour le découpage et le façonnage des éprouvettes. Si ces essais sont fort utiles pour la réception des matériaux de choix, ils sont quelquefois appliqués sans grande utilité à certains produits courants, qui, justement, présentent les écarts les plus considérables d'une éprouvette à l'autre. On peut recommander, dans ce cas, de n'user qu'avec modération des essais de traction, surtout lorsque des procédés plus simples et plus expéditifs, tels que le pliage et l'essai au choc, permettent d'apprécier suffisamment la qualité du métal.

4° Il convient que les résultats des essais mécaniques ne soient pas donnés avec une précision apparente supérieure à celle des observations.

5° Pour la plupart des essais courants, il peut suffire d'une approximation à 1 ou 2 0/0 près dans les résultats.

6° Il convient de ne pas hésiter à faire usage d'appareils enregistreurs des efforts et déformations, qui sont commodes et préviennent les erreurs graves, même quand ils ne sont pas d'une précision extrême.

7° On doit éliminer dans le calcul des moyennes établies à un point de vue scientifique les éprouvettes présentant exceptionnellement des défauts localisés dans l'éprouvette même.

CHAPITRE II

PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

État du métal. — 1° On doit toujours indiquer si le métal à apprécier a été laissé à l'état naturel, ou s'il a été trempé, recuit ou écroui, etc.

Pour les métaux mous surtout, il est indispensable de prendre note de l'état d'écrouissage.

2° Dès que le métal a été amené à l'état où on veut l'apprécier, on doit éviter, dans le prélèvement et le façonnage de l'éprouvette, toute opération qui peut en altérer la nature et fausser les résultats des essais.

3° Lorsqu'on veut apprécier la qualité du métal employé pour la fabrication d'une pièce, il faut prélever, avant toute élaboration, la prise qui doit donner le barreau d'essai ou, dans le cas d'impossibilité, détruire l'influence de cette élaboration sur la pièce par un recuit donné dans des conditions convenablement déterminées.

Si on se borne à faire recuire l'éprouvette elle-même, après qu'elle est détachée de la pièce finie, on peut obtenir des résultats différents notamment aux essais de traction, et surtout avec les métaux mous.

4° Lorsqu'on veut apprécier seulement l'état du métal

dans la pièce finie, il convient d'opérer sur des éprouvettes qui soient, autant que possible, dans le même état d'écrouissage que la pièce à éprouver.

5° En général, l'éprouvette prise sur le produit fourni est celle qui intéresse le plus le consommateur; toutefois, en certains cas, il peut être utile d'en prélever au cours de la fabrication.

6° En ce qui concerne le cuivre et ses divers alliages en planches, pour avoir des résultats comparables, il convient de les essayer après le dernier recuit de la fabrication des planches.

7° Certaines pièces en cuivre (barres d'entretoises, plaques de foyers, etc.) étant préparées par écrouissage, il faut s'attacher, en ce cas, dans le découpage des éprouvettes, à ne pas les modifier, si on veut apprécier le métal dans cet état.

Emplacement et prélèvement des prises d'essai. — 1° D'une manière générale, on prélève les prises d'essai dans la région de la pièce où la qualité que l'on veut vérifier a le plus d'importance en service, et surtout dans celle où elle est probablement le moins développée.

2° Le prélèvement des prises doit être opéré, autant que possible, dans les conditions suivantes :

a) Dans les pièces forgées, au milieu des parties les plus massives.

S'il y a un sens d'étirage à la forge, les barreaux d'essais sont le plus souvent orientés suivant la direction de cet étirage. Il peut être utile de découper des barreaux perpendiculaires à cette direction, mais les conditions ordinaires admises pour les éprouvettes prises en long ne peuvent pas s'appliquer sans atténuation aux éprouvettes en travers.

b) Dans les produits laminés, on prélève des prises aux deux bouts.

c) Dans les laminés à section compliquée, on prélève ces prises dans les parties les plus massives et les plus minces.

d) Dans les tôles, et particulièrement dans les tôles de fer, on prélève des prises en long et en travers soit dans les chutes, soit dans les découpures intérieures.

e) Avec les métaux ayant subi la fusion, soit qu'ils restent à l'état de pièces moulées, soit que les lingots doivent être ultérieurement travaillés, on peut admettre que, pour les produits communs, une prise d'essai au milieu de la coulée peut suffire à définir la coulée entière ; mais, pour les produits fins, pour les grandes coulées, et lorsque le procédé de fabrication risque de modifier le métal pendant la coulée même, on fait des prises d'essais au début, au milieu et à la fin de l'opération.

f) Pour les moulages, on prend soit une éprouvette adhérente à chaque pièce importante, immédiatement dans le pied de la masselotte, soit une éprouvette séparée pour chaque lot un peu considérable de petites pièces d'une même coulée.

Si l'on veut vérifier plus rigoureusement la qualité des moulages, il faut de temps en temps sacrifier une pièce pour en essayer les parties les plus minces et les plus massives.

Ces prises multipliées sont surtout utiles pour les produits en bronze, et particulièrement les bronzes spéciaux : il convient alors de contrôler par des essais les diverses étapes de la fabrication, et de faire porter les épreuves sur un certain nombre de pièces finies prélevées à des périodes différentes d'une même coulée.

g) Pour les pièces de fonte et d'acier moulé ayant, en quelque partie, plus de 8 centimètres d'épaisseur, les barreaux d'essai sont prélevés dans le pied de la masselotte.

h) Pour les pièces de fonte et d'acier moulé d'une épaisseur inférieure à 8 centimètres, les barreaux d'essai peuvent être coulés en châssis séparés ou venir de fonte avec les pièces.

i) Lorsque les barreaux d'essai sont coulés à part, on observe les précautions suivantes :

L'inclinaison du moule est fixée à 20 centimètres environ par mètre, et on donne à la masselotte une longueur de 15 à 20 centimètres.

Il n'y a pas de masselotte spéciale pour les barreaux coulés attenant aux pièces.

Confection des barreaux d'essai. — 1° Pour les tôles et

larges plats, les bandes dans lesquelles sont découpés les barreaux doivent avoir une largeur supérieure à celle de ces barreaux d'une quantité au moins égale à deux fois leur épaisseur.

2° Ces bandes peuvent être détachées à la cisaille, au poinçon, à la scie, à la tranche ou à la machine-outil, etc.

3° Si l'on détache la bande à la cisaille, il faut éviter qu'elle ait à subir aucune déformation dans les découpages successifs ; on la maintient au besoin serrée à la presse pendant ces opérations.

4° Si, malgré ces précautions, la bande est déformée, on la redresse à froid, lorsque la déformation a été faible. Pour les bandes de fer et d'acier, le redressage peut être opéré à chaud, pourvu que la température ne dépasse pas celle du rouge sombre (700° environ), en prenant les précautions nécessaires, notamment en employant des maillets en bois.

5° Les éprouvettes sont détachées des bandes à froid et uniquement à la machine-outil.

6° Dans la généralité des cas, il suffit de travailler les champs pour amener les éprouvettes rectangulaires à leur forme définitive.

Les éprouvettes sont travaillées sur toutes leurs faces quand la section est trop forte pour la machine d'essai ou encore si l'inégalité d'épaisseur peut faire craindre des déformations par flexion.

7° On a soin d'enlever sur la bande la zone qui a pu être altérée par l'action de l'outil employé, cisaille, tranche ou poinçon.

8° Cet enlèvement doit se faire à la scie, à la raboteuse, au tour, à la meule, à l'alésoir ou à la fraise, ou même, dans les dernières passes, à la lime. Il convient d'ailleurs de diminuer l'épaisseur du métal enlevé dans les dernières passes, et de s'attacher, surtout pour les éprouvettes de traction, à ce que l'outil ne s'arrête pas à l'intérieur de la longueur utile, ce point d'arrêt pouvant devenir une amorce de rupture.

Il est bon également d'adoucir à la lime les arêtes vives.

9° Avec les métaux mous comme les cuivres et les laitons, les éprouvettes sont, autant que possible, entièrement faites

à la lime ; si on les ébauche à la fraise, il faut laisser toujours au moins $0^{mm},5$ à prendre à la lime.

10° Pour les métaux coulés, les barreaux d'essai, coulés à part ou détachés des pièces, sont façonnés à la machine-outil, tournés ou dressés ; les surfaces et les arêtes de la partie utile sont adoucies à la lime.

Sur les barreaux bruts, on ménage dans toute l'étendue de la longueur utile, comme matière à enlever, un excédent d'épaisseur de $2^{mm},5$.

CHAPITRE III

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LES RÉSULTATS DES ESSAIS

Essais pratiqués à des températures déterminées. — *Influence des températures supérieures à* 100°. — Les précautions à prendre pour les essais à des températures déterminées supérieures à 100°, sont les suivantes :

a) Les métaux sont au préalable recuits à une température supérieure à la plus élevée de celles qu'ils ont à supporter au cours des essais.

L'indication des conditions dans lesquelles a été fait ce recuit doit être jointe aux résultats des essais.

b) L'évaluation de la température du barreau d'essai doit être faite avec le plus grand soin.

Quand le chauffage est fait par l'intermédiaire d'un liquide, on peut, à la rigueur, se contenter de mesurer la température de ce liquide ; mais il est toujours préférable de prendre directement celle du barreau au moyen d'un couple thermo-électrique.

Dans le cas où on chauffe le barreau au moyen d'un courant d'air chaud, le couple thermo-électrique permet seul d'obtenir exactement sa température.

c) La partie du barreau renfermée dans l'appareil de chauffage doit avoir une longueur double de la longueur

utile servant aux mesures d'allongements ; on a soin de placer cette longueur utile dans la partie médiane de l'appareil de chauffage.

d) La durée de chaque essai est notée avec soin ; l'influence de cette durée pouvant être considérable à certaines températures, il convient de faire à une même température des essais de durées différentes, en particulier des essais de longue durée qui semblent devoir donner les renseignements les plus utiles au point de vue pratique.

Influence des températures inférieures à 100°. — 1° Les précautions à prendre pour les essais à des températures déterminées inférieures à 100° sont les suivantes :

a) L'évaluation de la température du barreau d'essai doit être faite avec le plus grand soin.

b) Le métal doit être amené à la température à laquelle on veut l'expérimenter par l'immersion dans un liquide tel que l'alcool, l'eau ou l'huile.

c) Entre 100 et 15°, il est préférable d'employer l'huile, qui, dans le cas où l'essai est fait en dehors du bain liquide (essais de choc ou de fragilité), fournit une couche protectrice empêchant le refroidissement du barreau, tandis que l'eau, par son évaporation, active ce refroidissement.

Au-dessous de 15°, quand on ne dispose pas de machines frigorifiques, les mélanges réfrigérants dont l'emploi est le plus commode sont :

Jusqu'à 0°, l'eau refroidie à la glace ;

De 0 à — 18°, le mélange de glace et de sel ;

De 0 à — 45°, le mélange de glace et de chlorure de calcium cristallisé ;

De 0 à — 70°, l'alcool refroidi avec de l'acide carbonique solide.

2° Les essais de choc et de fragilité doivent être exécutés en un seul coup de mouton, si possible ; sinon, il convient de ramener le barreau à la température d'essai à chaque coup ou de deux en deux coups.

Essais courants pratiqués aux températures ordinaires. — 1° Les essais de traction doivent se faire, autant que possible,

à des températures comprises entre 10° et 30°. Dans ces limites, il n'y a pas lieu de se préoccuper, pour ces essais, de l'influence des variations de la température.

2° Cette influence doit, au contraire, être prise en considération dans les essais de flexion au choc.

3° Pour l'atténuer dans la mesure du possible, il y a lieu :

a) De ramener tous les barreaux ou pièces soumis à ces essais à la température de 15° environ ;

b) D'exécuter ces essais avec le nombre de coups de mouton le plus faible possible.

4° Il convient d'indiquer le nombre de coups de mouton et les données relatives à l'intensité du choc (hauteur de chute, poids du mouton).

Si le nombre des coups de mouton est supérieur à deux, il conviendra de ramener le barreau ou la pièce, autant que possible, de deux en deux coups à une température voisine de 15°, ou de les refroidir continuellement au cours de l'essai au moyen d'un arrosage convenablementd isposé. On indique si cette condition a pu être réalisée ou non.

CHAPITRE IV

OBSERVATIONS GÉNÉRALES SUR LES APPAREILS D'ESSAI

Appareils opérant par action graduée. — *Machines à essayer par traction.* — 1° Dans l'état actuel de l'art de la construction, il paraît utile que les machines à essayer les métaux à la traction aient un organe de traction et un organe de mesure indépendants.

2° Le choix du type est essentiellement subordonné aux conditions d'emploi. En conséquence, toutes les combinaisons mécaniques sont acceptables, pourvu qu'elles soient bien conçues et en rapport avec le but à atteindre.

3° Les machines de cette espèce sont soumises aux règles applicables à toute bonne construction mécanique soignée et spécialement à celle des appareils de pesage.

On doit, en particulier :

a) Proportionner le rayon de l'arête des couteaux à l'effort qu'ils doivent supporter ;

b) Placer les couteaux sur les leviers et les chapes sur les bielles de connexion ;

c) Eviter les rapports de bras de levier exagérés.

4° On doit recommander en outre :

a) Que les organes de mesure soient aussi simples que possible ;

b) Que l'entretien et la vérification en soient faciles.

5° Les organes de traction doivent être combinés de façon à réaliser, dans les essais, les conditions de durée recommandées par la Commission.

6° Ils doivent également remplir la condition de produire des accroissements de charge progressifs et sans chocs.

7° Pour les essais de pratique courante, il suffit que les organes de mesure soient exacts à 1/250e près pour le demi-effort maximum.

8° On doit vérifier les machines à essayer les métaux au moyen de poids marqués, directement appliqués à l'organe de mesure, toutes les fois que les dispositions des machines permettent de le faire.

Lorsque cela n'est pas possible, il y a lieu de recommander l'emploi d'un appareil analogue au dynamomètre de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée (système Lebasteur) ou remplissant le même but avec la même précision ; on vérifie les indications de ces appareils au moyen de poids marqués, aussi souvent qu'il est reconnu nécessaire pour écarter toute incertitude.

Dans la construction des machines, on doit prévoir entre les attaches l'emplacement nécessaire pour atteler les appareils de vérification.

9° Il n'y a pas lieu de recommander un mode spécial pour l'attache des éprouvettes. Il suffit que les attaches employées soient disposées de façon que les éprouvettes soient soumises à la traction suivant leur axe et ne subissent aucune flexion ou torsion du fait des attaches.

Cette condition s'applique aux attaches de toute sorte ; celles qui agissent par pression transversale doivent, en outre, rem-

plir la condition de ne pas laisser glisser les barreaux pendant la traction; le taillage et la forme des coins striés doivent être combinés en conséquence.

10° Il est très utile d'enregistrer les allongements élastiques au moyen d'appareils de précision combinés à cet effet; l'emploi de ces appareils facilite beaucoup la détermination de la période d'élasticité, sur laquelle tout autre moyen d'observation laisse toujours quelque incertitude. Ces appareils doivent être disposés de façon à enregistrer, autant que possible, l'allongement de la fibre moyenne.

11° En ce qui concerne les allongements permanents, on doit considérer les appareils enregistreurs comme des moyens commodes de contrôle des opérations de traction.

Il n'est pas nécessaire que les appareils enregistreurs des allongements permanents soient aussi précis que ceux employés pour relever les allongements élastiques; ils peuvent en être distincts sans aucun inconvénient, attendu que l'amplification des allongements élastiques est et doit être tout à fait différente de celle des allongements permanents.

Machines à essayer par compression. — 1° Les machines à essayer les métaux par compression doivent être assujetties aux mêmes règles générales que les machines à essayer par traction.

D'ailleurs, les machines à essayer par traction peuvent souvent être employées aux essais par compression en les complétant par un appareil spécial de réversion des efforts.

2° Les machines à essayer par compression doivent satisfaire aux conditions spéciales suivantes :

a) On doit prendre des dispositions pour que l'opérateur puisse, à volonté, faire coïncider l'axe neutre des objets soumis à la compression avec la direction de la résultante des efforts de compression exercés par la machine.

b) Pour que cette coïncidence puisse être maintenue pendant la compression, il peut être utile que l'un des plateaux entre lesquels elle s'exerce puisse s'orienter de lui-même.

c) Afin qu'elles ne s'écrasent pas sous les efforts exercés, les surfaces d'appui doivent être plus dures que les objets soumis à l'expérience.

Machines à essayer par flexion, pliage, cintrage et courbage. — 1° Les machines à essayer les métaux par flexion, pliage, cintrage et courbage doivent être assujetties aux mêmes règles générales de construction que les machines à essayer par traction.

D'ailleurs, les machines à essayer par traction peuvent souvent être employées aux essais par flexion, en les complétant par un appareil convenablement disposé.

Ces machines doivent être combinées de façon à permettre d'exécuter les essais commodément et sans à-coups.

2° Il y a lieu de distinguer parmi les machines de cette espèce :

a) Les machines à essayer les matériaux de petit échantillon, qui peuvent être classées en trois catégories :

α. Les appareils destinés à essayer les barreaux à la flexion;

β. Les machines à plier proprement dites ;

γ. Les machines à cintrer ou à courber.

Les appareils destinés à essayer les barreaux à la flexion doivent permettre d'évaluer l'effort de flexion développé; cette condition peut être utile pour les autres machines de l'espèce.

b) Les machines à essayer les rails et autres grosses pièces: ces machines doivent être robustes, agencées de façon à faciliter la manutention des objets relativement pesants auxquels elles s'appliquent.

Il est bon qu'elles soient munies d'un appareil enregistreur des flèches.

c) Les machines à essayer les ressorts : ces machines doivent permettre de réaliser facilement et régulièrement l'essai par flexion et, en outre, l'essai par oscillations répétées ou par balancement.

Machines à essayer par torsion. — 1° Les machines à essayer les métaux par torsion sont assujetties aux mêmes règles générales de construction que les machines à essayer par traction.

2° Ces machines doivent être agencées de manière que l'axe de la pièce essayée ne subisse aucune flexion.

Il est utile, dans certains cas, qu'elles donnent le moyen

de soumettre la pièce à un effort de torsion et à un effort de traction simultanés.

Appareils opérant par action brusque. — 1° Le choc peut être produit de manières très différentes; jusqu'ici, le procédé le plus couramment employé est celui du mouton, qui est commode dans la plupart des cas.

2° Le guidage du mouton doit être absolument rigide, plan et vertical; il doit être disposé de telle sorte que le frottement, dans la chute, soit réduit au minimum.

3° Le mouton doit être de masse et de forme symétriques par rapport au plan du guidage.

4° Le centre de gravité du mouton doit être placé le plus bas possible dans le plan du guidage et sur la verticale équidistante des deux guides.

5° La hauteur de la partie guidée du mouton doit être notablement plus grande que l'intervalle entre les guides.

6° L'appareil à déclic ne doit produire aucun mouvement latéral du mouton lors de sa mise en jeu.

7° La chabotte doit constituer, soit par elle seule, soit avec un massif de maçonnerie solidaire, une masse incompressible considérable par rapport à celle du mouton (s'il est possible 15 fois à 20 fois la masse du mouton); ce rapport doit être d'autant plus élevé que la hauteur de chute est plus considérable.

CHAPITRE V

EXAMEN DES GRANDEURS A MESURER

1° Dans un essai complet, il convient de relever les efforts et les déformations correspondant aux deux périodes caractéristiques qu'on retrouve dans tout essai opérant par action continue : déformations élastiques et déformations permanentes.

2° En ce qui concerne la période élastique, on distingue les trois limites suivantes :

a) La *limite d'élasticité* au-dessus de laquelle les déformations cessent d'être momentanées (point E) ;

b) La *limite d'élasticité proportionnelle* ou *limite des déformations proportionnelles* correspondant au point où les déformations cessent d'être proportionnelles aux efforts (point P) ;

c) La *limite d'élasticité apparente* ou *origine des déformations sous charge constante* correspondant au point où les déformations prennent une valeur de plus en plus accentuée sans augmentation de l'effort exercé (point F).

3° Il est généralement admis que la limite d'élasticité proprement dite coïncide avec la limite d'élasticité proportionnelle, telle qu'elle vient d'être définie, c'est-à-dire que le point E coïncide avec le point P.

4° En ce qui concerne la période des déformations permanentes, on distingue la charge maxima supportée, les déformations correspondantes, la charge de rupture et les déformations correspondantes.

5° L'observation de ces diverses quantités ne peut pas d'ailleurs se faire dans la plupart des essais ; on peut se borner le plus souvent à noter, dans l'essai de traction par exemple, la charge maxima supportée, l'allongement après rupture et la striction.

6° Les efforts sont exprimés en kilogrammes, les longueurs en millimètres et les sections en millimètres carrés.

7° Pour les épreuves hydrauliques, les pressions sont exclusivement exprimées en kilogrammes par centimètre carré.

A moins de mention contraire, on considère la pression effective, c'est-à-dire la différence entre les efforts antagonistes exercés sur les deux faces de la paroi sollicitée.

QUATRIÈME PARTIE

ESSAIS MÉCANIQUES
ÉTUDE DÉTAILLÉE DES DIVERSES MÉTHODES D'ESSAI

PREMIÈRE CLASSE

MÉTHODES D'ÉPREUVE OPÉRANT PAR ACTION GRADUÉE

Les essais doivent toujours être effectués d'une manière aussi régulièrement progressive que possible.

CHAPITRE I

ESSAIS DE TRACTION

Limites de la période élastique. — Les trois limites de la période élastique sont définies avec les approximations suivantes :

a) La *limite d'élasticité* est la charge maxima, rapportée au millimètre carré de la section primitive, correspondant au point E de l'échelle des efforts de traction, qui ne produit pas d'allongement permanent, c'est-à-dire que, si l'on supprime l'action de cette charge, l'éprouvette revient (en moins d'un quart d'heure) à ses dimensions primitives (à 1/1000 de millimètre près sur 200 millimètres).

b) La *limite d'élasticité proportionnelle* est la charge, rapportée au millimètre carré de la section primitive, correspondant au point P de l'échelle des efforts de traction, en deçà

duquel les allongements sont sensiblement proportionnels aux charges (à 1/1000 de millimètre près sur 200 millimètres pour une variation de charge de 1 kilogramme par millimètre carré de la section de l'éprouvette).

c) La *limite apparente d'élasticité* est la charge, rapportée au millimètre carré de la section primitive, correspondant au point F de l'échelle des efforts de traction, au delà duquel les allongements commencent à croître sensiblement, sans augmentation de l'effort. (Ce point correspond à l'arrêt ou à la chute des manomètres ou leviers des machines à essayer.)

Efforts et allongements développés dans la période des déformations permanentes. — 1° Dans la période des déformations permanentes, on mesure la charge maxima supportée, mais il ne paraît pas utile, dans les essais de pratique courante, d'effectuer la mesure de la charge effective de rupture.

2° La charge totale est généralement rapportée à la section initiale, pour donner la valeur de l'effort exercé par millimètre carré.

3° En ce qui concerne la mesure des allongements, il suffit en général, dans les essais de pratique courante portant sur des produits d'une même fabrication bien déterminée, de mesurer l'allongement total après rupture.

S'il s'agit au contraire d'étudier des produits d'une fabrication nouvelle ou de comparer entre eux des produits de fabrications différentes, il peut être utile de pratiquer quelques expériences spéciales afin de déterminer la valeur relative des divers éléments de l'allongement total.

4° Pour obtenir une mesure exacte de l'allongement total, il convient d'éliminer des essais tout barreau dont la striction n'est pas entièrement comprise entre les repères.

5° On complète ces observations par la mesure de la section de rupture qui donne la striction $\frac{\Omega_0 - \Omega_R}{\Omega_0}$.

Coefficients de qualité. — 1° Pour l'appréciation des résultats des essais de pratique courante, il ne paraît pas utile de recommander la mesure du travail de traction.

2° Il en est de même des coefficients dits de qualité.

3° On ne peut guère se servir de ces coefficients que pour exprimer les tolérances d'une façon simple et abrégée; il n'y a pas lieu de recommander l'emploi de ceux qu'on a proposés jusqu'ici.

Mesure des efforts et des allongements. — 1° Dans les essais ordinaires, les charges totales peuvent être mesurées avec une approximation de 25 kilogrammes pour les efforts inférieurs à 5.000 kilogrammes, et avec une approximation de 50 kilogrammes pour les efforts supérieurs à cette charge.

2° Pour fixer la précision à apporter dans la mesure des dimensions longitudinales et transversales des éprouvettes, on peut spécifier que toute dimension égale ou inférieure à 10 millimètres sera mesurée à 5/100 de millimètre près, et toute dimension supérieure à 10 millimètres à 1/10 de millimètre près.

Pour effectuer la mesure de la section de rupture, on prend, dans le cas d'éprouvettes circulaires, l'aire d'un cercle ayant pour diamètre la moyenne de deux diamètres relevés autant que possible dans des directions perpendiculaires sur cette section.

Dans le cas d'éprouvettes carrées ou rectangulaires, on prend l'aire d'un rectangle ayant pour largeur et pour épaisseur les largeur et épaisseur moyennes de la section de rupture.

Dimensions des éprouvettes. — Section et longueur utiles. — 1° Pour obtenir des résultats satisfaisants, il convient que les repères se trouvent à une distance des naissances des attaches ou des congés des têtes au moins égale au diamètre ou au plus grand côté de la section transversale de l'éprouvette.

2° Dans ces conditions, la forme des têtes paraît indifférente.

3° Lorsqu'on veut comparer, autant qu'il est possible, les allongements totaux après rupture d'éprouvettes de tracés différents, il faut observer une relation déterminée entre la

section transversale de l'éprouvette et la longueur utile. On adopte à cet effet la formule suivante :

$$\Lambda^2 = \frac{200}{3}\,\Omega = 66{,}67\Omega.$$

4° On prend pour les éprouvettes rondes :

Longueur entre repères.....	$\Lambda = 200^{mm}$
Diamètre.....	$D = 27^{mm},64$
Section.....	$\Omega = 600^{mm2}$

ou toute autre éprouvette géométriquement semblable, notamment celles qui sont définies par le tableau ci-après :

DIAMÈTRES D	SECTIONS Ω	LONGUEURS ENTRE REPÈRES Λ	$\frac{\Lambda}{D}$
mm.	mm²	mm.	
27,64	600	200	7,235
19,55	300	141	
13,82	150	100	
9,77	75	70	

5° Les éprouvettes carrées d'épaisseur supérieure à 5 millimètres ont leurs dimensions rattachées entre elles, autant que possible, par la même formule :

$$\Lambda^2 = \frac{200}{3}\,\Omega = 66{,}67\Omega.$$

6° Pour faciliter la confection des éprouvettes rectangulaires, on les réunit en plusieurs séries dans chacune desquelles la largeur est constante. On peut adopter à cet effet le groupement suivant:

LARGEURS l	ÉPAISSEURS e	SECTIONS Ω	LONGUEURS ENTRE REPÈRES A	DIFFÉRENCES ΔA
	mm.	mm²	mm.	mm.
30 millim.	5	150	100	9
	6	180	109	9
	7	210	118	8
	8	240	126	8
	9	270	134	7
	10	300	141	»
25 millim.	11	275	135	6
	12	300	141	6
	13	325	147	6
	14	350	153	5
	15	375	158	5
	16	400	163	5
	17	425	168	5
	18	450	173	5
	19	475	178	5
	20	500	183	»
20 millim.	21	420	167	4
	22	440	171	4
	23	460	175	4
	24	480	179	4
	25	500	183	4
	26	520	187	4
	27	540	191	3
	28	560	194	3
	29	580	197	3
	30	600	200	»

7° Pour les éprouvettes d'épaisseur inférieure à 5 millimètres, on adopte les dimensions suivantes :

Les barreaux d'essai ont 100 millimètres entre les repères.

Ils sont rectangulaires.

Leur épaisseur est celle de la bande à expérimenter.

Leur largeur est déterminée d'après le tableau ci-après :

ÉPAISSEUR	LARGEUR
$5^{mm} > e > 2^{mm},8$	14^{mm}
$2^{mm},8 \geq e > 1^{mm},2$	8^{mm}
$1^{mm},2 \geq e$	6^{mm}

Si l'on emploie des éprouvettes terminées par des têtes, les repères doivent être tenus à 10 millimètres au plus des têtes, auxquelles on donne des dimensions suivantes:

Leur largeur doit être environ deux fois celle du barreau, et leur longueur est au moins égale à leur largeur.

Les têtes sont raccordées au corps par un congé compris entre la tête et le repère.

Ce congé, tangent au corps du barreau, est formé par un arc de cercle de 6 millimètres de rayon.

Conduite de l'essai. — 1° Il convient que l'essai soit exécuté par traction progressive.

2° La durée de l'essai doit être, dans une certaine mesure, fonction du volume de l'éprouvette.

3° Pour les essais courants d'éprouvettes de dimensions ordinaires dont la section ne dépasse pas 600 millimètres carrés et la longueur entre repères 20 centimètres, la durée de l'essai peut être comprise entre une et six minutes.

4° Pour les éprouvettes d'épaisseur inférieure à 5 millimètres, la durée de l'essai peut s'abaisser à trente secondes.

5° Il faut éviter, surtout avec les métaux mous, de produire un échauffement sensible des barreaux.

CHAPITRE II

ESSAIS DE COMPRESSION

Essais sur pièces courtes. — 1° Pour la recherche des limites de la période élastique, il est recommandé d'adopter l'usage d'éprouvettes cylindriques de $27^{mm},65$ de diamètre (600 millimètres carrés de section) et d'une longueur la plus réduite, quoique suffisante pour permettre d'observer les raccourcissements sur une longueur de 100 millimètres.

2° Si l'on veut déterminer seulement la résistance maxima à la compression ou à l'écrasement, on adopte l'usage d'éprouvettes cylindriques de $19^{mm},56$ de diamètre (300 millimètres carrés de section) et de 20 millimètres de longueur, les bouts étant, dans tous les cas, terminés par des faces planes parfaitement normales à l'axe des éprouvettes.

Essais sur pièces longues (flambement). — 1° La résistance au flambement est la charge minima rapportée au millimètre carré de section qui produit le flambement.

Pour le fer et l'acier, la résistance au flambement n'est nullement proportionnelle à leur résistance à la traction et ne peut, dans l'état actuel de la science, être prévue d'après les résultats des essais usuels.

2° Les essais peuvent porter soit sur des pièces rivées, soit sur des barres, soit sur des barreaux prélevés dans ces pièces ou barres.

Pour que deux essais soient comparables, il suffit que le rapport de la longueur de l'éprouvette au rayon de giration minimum de la section ait la même valeur.

Dans les essais sur éprouvettes, il convient de donner à ce rapport des valeurs multiples de 5 ou de 10.

3° Il faut avoir soin de placer les barreaux essayés dans un état bien défini, tel que l'articulation parfaite ou l'encastrement complet.

4° Lorsque les barreaux sont articulés :

a) Les attaches ne doivent produire, dans une mesure notable, ni frottement, ni encastrement, ni résistance quelconque qui retarde le flambement du barreau d'essai dans le plan de sa moindre résistance;

b) L'axe neutre du barreau doit être, aussi parfaitement que possible, centré, c'est-à-dire placé suivant une ligne droite passant par les points ou par les axes d'articulation.

5° Lorsque les barreaux sont encastrés :

a) L'encastrement des extrémités doit être réalisé sans développer le moment de flexion dans le barreau d'essai;

b) L'axe neutre du barreau doit être parallèle au mouvement d'avancement des pièces dans lesquelles les extrémités du barreau sont encastrées.

6° On peut réaliser une articulation suffisamment parfaite en prenant comme axes de rotation les arêtes de biseaux à angles obtus formés d'acier trempé et ayant assez de longueur pour que la pression qu'ils ont à supporter ne les écrase ni ne les fasse pénétrer dans les platines en acier trempé qui leur transmettront la pression de la machine d'essai.

Cette disposition n'est pas indiquée à titre exclusif.

Pour que les essais soient plus exacts et plus comparables, on doit employer un dispositif permettant de constater l'existence et le sens des faibles flexions que prend chaque barreau sous une charge initiale assez réduite pour ne pas lui causer de déformations permanentes, et de rectifier la position du barreau sous charge jusqu'à ce que ces flexions soient sensiblement nulles.

CHAPITRE III

ESSAIS DE FLEXION

Essais sur éprouvettes. — *Fontes.* — 1° La section des barreaux-types finis est de 40 millimètres sur 40 millimètres, à moins d'impossibilité.

2° Les barreaux servant aux essais sont dressés, les surfaces et les arêtes sont adoucies à la lime.

3° La longueur des barreaux d'essai est déterminée d'après le type de la machine employée de manière à dépasser seulement d'une quantité suffisante l'écartement des appuis qui délimite la longueur utile sur laquelle porte l'épreuve.

Dans l'appareil Monge, cette longueur utile est de 150 millimètres; dans la balance Joëssel, elle est de 500 millimètres. La longueur effective peut être fixée dans le premier cas à 500 millimètres et à 600 dans le second.

4° Les machines employées aux essais de flexion doivent avoir des couteaux dont les faces convergentes forment un angle de 45° et dont l'arête soit arrondie suivant un rayon de 2 millimètres.

5° La durée de l'essai doit être comprise entre une et deux minutes.

Lames d'acier à ressorts. — 1° La lame d'essai prélevée dans la barre (sans modification de section) a entre les points d'appui une longueur développée de 1 mètre.

2° La lame d'essai est préparée dans les conditions de trempe et de recuit semblables à celles qui sont suivies pour la fabrication des ressorts.

3° La lame repose sur deux chariots mobiles munis de couteaux en saillie, permettant à la lame de se développer pendant l'essai, sans changement sensible des points d'appui.

4° L'essai doit se faire sans arrêts ni suppression de charge jusqu'à la flèche imposée.

5° La progression de l'effort est régulière et continue, et produite avec une vitesse telle que la durée de l'essai est comprise entre deux et cinq minutes.

Essais sur pièces finies. — *Ressorts à lames parallèles.* — 1° On doit ne soumettre, autant que possible, les pièces qu'à un effort inférieur à celui qui correspond à la déformation permanente du ressort.

2° Dans cet essai, les deux extrémités des ressorts doivent reposer sur deux petits chariots afin de se déplacer aussi librement que possible sous les efforts de flexion agissant sur les ressorts.

Ressorts en spirale. — On doit ne soumettre, autant que possible, les pièces qu'à un effort inférieur à celui qui correspond à la déformation permanente du ressort.

Rails et éclisses. — 1° L'application de l'effort de flexion doit, autant que possible, être faite en vue de déterminer la charge correspondant à la limite d'élasticité proportionnelle.

2° La durée de l'essai doit être comprise entre deux et cinq minutes.

CHAPITRE IV

ESSAIS DE PLIAGE, CINTRAGE ET COURBAGE

Pliage. — 1° L'uniformisation des dimensions des lamettes est désirable pour faciliter l'essai et simplifier les engins qui servent à l'opérer. On peut recommander les dimensions suivantes adoptées déjà dans bien des cas : 40 millimètres de largeur et 250 millimètres de longueur.

Pour les éprouvettes en cuivre ou en laiton, la longueur peut être réduite à 150 millimètres.

Les mêmes dimensions sont conservées, autant que possible, pour les essais de cintrage et de courbage.

2° L'essai de pliage doit être exécuté de préférence à la machine, car les résultats des épreuves effectuées à la main dépendent en grande partie de l'habileté de l'ouvrier, et elles n'ont de valeur comparative que si elles sont pratiquées par le même opérateur.

3° Il convient d'ailleurs, dans les deux cas, de préciser toutes les circonstances de l'épreuve, comme les dimensions et le mode de préparation des barrettes, l'état du métal, le mode d'exécution de l'essai.

4° Les conditions à recommander pour l'essai de pliage sont celles qui le réalisent sous un effort lent, progressif, et qui permettent d'obtenir le pli initial avec le rayon de courbure différant le moins possible de celui exigé pour le pli-limite.

5° Quand on ne dispose que d'un étau pour faire l'essai, on peut recommander la façon d'opérer suivante, principalement pour des métaux devant subir un pliage limité à un angle obtus ou faiblement aigu :

a) Saisir la lamette au tiers de sa longueur dans les mâchoires de l'étau, rendre sa partie libre solidaire d'une barre d'acier rigide, et se servir de cette barre comme d'un levier pour plier la lamette à bras et sans à-coups.

b) La liaison du levier avec la lamette se fait de façon que l'effort ait son point d'application sur la partie la plus voisine de celle où doit se faire le pli ; suivant le rayon de courbure donné, ce point est plus ou moins rapproché des mâchoires de l'étau.

6° Pour des métaux peu sensibles à l'écrouissage que détermine le choc, on peut, à la rigueur, tolérer de faire le pliage au marteau.

7° On peut opérer de même pour les pièces de petit échantillon : rivets, boulons, tirefonds, clavettes, goupilles, etc., et tout le matériel susceptible, à la mise en place ou à l'emploi, de subir une déformation par choc.

Cependant on doit tenir compte de l'habileté de l'opérateur et ne comparer entre eux que les résultats fournis par les mêmes mains.

8° Pour l'essai mécanique, en l'absence de toute machine spéciale, on doit préconiser l'emploi de la presse hydraulique ou du marteau-pilon à double effet, transmettant lentement l'effort au moyen d'un dégorgeoir à arête arrondie et rayon variable, sur le milieu de la lamette posée sur un empreint. L'écartement des points d'appui de la lamette sur l'empreint doit être au maximum égal à la moitié de sa longueur, afin d'éviter que ses branches ne fléchissent, et ne prennent une déformation plus ou moins accentuée pendant le pliage.

Cintrage. — L'essai de cintrage sur mandrin doit être effectué, autant que possible, à la machine, dans les mêmes conditions que l'essai de pliage.

Il n'est pas encore possible de fixer toutes les précautions à observer dans l'essai de cintrage ; il convient, tout au moins pour faciliter la comparaison, de noter soigneusement

toutes les circonstances de l'essai : les dimensions de l'éprouvette, le mode de cintrage employé, le diamètre du mandrin, et d'indiquer si on a opéré à la main ou autrement et avec quel type de machine.

Il est bon également de marquer sur la barrette d'essai des points de repère d'un écartement déterminé, de manière à apprécier l'allongement obtenu dans le cintrage.

Courbage. — Dans l'essai de courbage, la barrette laissée libre en son milieu est saisie par ses extrémités dans deux mâchoires qui agissent en se rapprochant pour la courber. La région courbée prend alors une forme circulaire dont le rayon dépend de la qualité du métal et des dimensions de l'éprouvette. On doit adopter des dispositions de machines permettant de mesurer à chaque instant l'effort développé et la déformation correspondante.

CHAPITRE V

ESSAIS MIXTES (CISAILLEMENT ET POINÇONNAGE)

Cisaillement. — On peut effectuer cet essai avec les mêmes machines qui servent aux essais de traction ou de compression.

Quand on prend des éprouvettes cylindriques, on adopte les trois diamètres de 10, 20 ou 30 millimètres suivant la puissance de la machine d'essai dont on dispose.

Les épreuves doivent porter successivement sur la résistance au cisaillement simple et sur la résistance au cisaillement double.

Dans le premier cas, les deux pièces que traverse la broche-éprouvette doivent être entaillées chacune de leur

demi-épaisseur; la traction ou la compression doit s'exercer dans le même plan que leurs faces de contact, de manière à éviter autant que possible toute tendance à la flexion.

Dans le cas du cisaillement double, il est recommandé d'adopter le dispositif consistant à faire passer à frottement très doux la broche-éprouvette à travers deux flasques d'acier trempé dont l'une embrasse exactement l'œil de l'autre par une fourchette très soigneusement ajustée.

Les têtes des deux flasques ont une forme appropriée au type de la machine d'essai employée. L'écartement des branches de la fourchette qui termine l'une des flasques, ainsi que l'épaisseur de l'extrémité de la seconde flasque embrassée par la première, est égal au diamètre de la broche-éprouvette et par suite au diamètre des trois trous que cette broche traverse.

Poinçonnage. — Pour effectuer l'épreuve de poinçonnage proprement dite sur des bandes détachées dans les tôles ou profilés, on peut donner à ces bandes une largeur égale à quatre fois l'épaisseur de la tôle et pratiquer un ou plusieurs trous de diamètre égal à une fois et demie cette épaisseur; on peut adopter un espacement des trous égal à la distance des bords.

Avec les machines bien construites et bien entretenues, le jeu total à observer entre la matrice et le poinçon peut être limité à 3/10 de millimètre pour un diamètre inférieur à 10 millimètres, à 5/10 de millimétre pour un diamètre compris entre 10 et 30 millimètres, et à 1 millimètre pour un diamètre supérieur. (Il y a inconvénient à avoir un jeu trop élevé, car le métal se déchire davantage.)

Cet essai est effectué habituellement dans les conditions courantes du travail des ateliers, sans enregistrement de pression ni de vitesse; il est bon toutefois de pouvoir prendre note de ces éléments.

DEUXIÈME CLASSE

MÉTHODES D'ÉPREUVE OPÉRANT PAR ACTION BRUSQUE

1° L'emploi du choc dans les essais donne des renseignements que ne peut pas fournir l'action graduée.

2° Le choc peut être employé à produire des effets analogues à ceux que donnent les diverses méthodes par action graduée, mais en pratique on n'emploie que les essais de flexion, de pénétration et de perforation.

CHAPITRE I

ESSAIS DE FLEXION PAR CHOC

1° Dans les essais au mouton, le choc est caractérisé à la fois par le poids du mouton et la hauteur de sa chute, et non pas seulement par leur produit; il convient donc de noter séparément ces deux éléments.

. . . . . .

7° Les poids et hauteurs de chute, ainsi que les circonstances accessoires de l'essai, doivent être choisis de manière à produire, autant que possible, en les exagérant, séparément, dans leurs divers éléments (masse, vitesse, etc.), des effets analogues à ceux que le métal est destiné à subir du fait des chocs auxquels il doit être soumis en service.

8° Il est intéressant, pour les métaux bruts à comparer, d'opérer les essais au choc sur des barrettes de hauteur et de largeur déterminées, placées sur des supports dont la forme et l'écartement sont également déterminés, et d'employer des moutons de même poids tombant des mêmes hauteurs sur des chabottes de même masse.

On peut considérer comme convenables, pour les essais de barreaux d'épreuve, les données du tableau A ci-après, qui paraissent les plus couramment employées.

TABLEAU A[1]

NATURE DU METAL	SECTION CARRÉE du barreau d'épreuve (côté du barreau)	LONGUEUR des barreaux d'épreuve	ESPACEMENT des couteaux	CHUTE	
				HAUTEUR constante	HAUTEURS croissantes
	m.	m.	m.		cm.
Fonte moulée.....	0,04	0,20	0,16	Variant suivant la nature du métal	0,25 ; 0,30
					0,32 ; 0,34
Acier moulé.....	0,03	0,20	0,16		0,36 ; etc.
Bronze ou laiton.....	0,03	0,20	0,16	Id.	A déterminer par des expériences ultérieures
Gros aciers en barres....	0,03	0,20	0,16	Id.	
Gros fers en barres.....	0,03	0,20	0,16	Id.	

Pour les essais de précision, les barreaux sont rabotés, les surfaces et les arêtes sont adoucies à la lime.

9° Dans l'installation du mouton, la panne doit être terminée par une partie cylindrique dont l'axe est horizontal et situé dans le plan du guidage ; le développement de cette partie cylindrique est de 90° ; son rayon est déterminé, pour chacun des principaux types de mouton destinés aux essais par choc des barreaux d'épreuve, comme il est indiqué au tableau B ci-après.

L'extrémité de la panne peut être démontable ; mais, dans ce cas, elle doit être très solidement fixée au corps du mouton.

Les couteaux doivent être solidement fixés à la chabotte.

Les arêtes des couteaux doivent être parallèles au plan du guidage ; leur plan doit être horizontal.

Les arêtes des couteaux doivent être formées de deux faces faisant entre elles un angle de 45° et raccordées par un arc de cercle de 2 millimètres de rayon.

1. Les lignes horizontales du tableau A correspondent à celles du tableau B.

TABLEAU B

NATURE DU MÉTAL DU BARREAU	POIDS DU MOUTON	RAYON de LA PANNE
	kg.	cm.
Fonte moulée	12	5
Acier moulé	18	3
Bronze ou laiton	18	3
Gros aciers en barres	50	3
Gros fers en barres	50	3

10° La pièce à essayer, s'il s'agit d'un barreau, doit être placée normalement aux couteaux et son axe horizontal doit passer par l'axe vertical du mouton.

11° Selon l'emploi auquel est destinée la pièce (chocs en service ne pouvant pas l'altérer, ou de nature à l'altérer), on peut accepter ou non l'emploi d'un chapeau entre cette pièce et la panne du mouton. En tout cas, on doit mentionner que l'essai est fait avec ou sans chapeau intermédiaire.

12° Dans le cas où l'on ne dispose que d'éprouvettes trop courtes pour permettre l'essai ordinaire au mouton, on a recours à l'encastrement de l'éprouvette. La pièce d'encastrement doit tenir l'éprouvette d'une manière rigide ; cette pièce doit être disposée de manière à permettre de ramener pour chaque coup à l'horizontalité, par une rotation autour d'un axe horizontal, la partie de l'éprouvette destinée à recevoir le choc du mouton.

Épreuve de l'escarpolette. — L'épreuve de l'escarpolette effectuée soit avec un mouton oscillant, soit par simple chute sur le sol, est un essai très simple qui donne immédiatement une indication importante sur la fragilité de la pièce essayée.

CHAPITRE II

ESSAIS DE PÉNÉTRATION SUPERFICIELLE PAR CHOC

1° Toute latitude peut être laissée aux expérimentateurs pour le choix du poids du mouton et de la hauteur de chute ; toutefois, cette dernière doit être réglée de façon à éviter les rebondissements du mouton.

2° On peut adopter une forme quelconque de couteau, pourvu que le volume de l'empreinte puisse se calculer en fonction d'une de ses dimensions.

Il faut éviter l'emploi des couteaux à arêtes courbes.

Les couteaux les plus commodes sont ceux qui ont des angles très obtus dans les deux sens, parce qu'ils donnent des empreintes plus longues à égalité de volume, qu'ils évitent le gonflement de la surface et les écarts latéraux.

3° Pour éviter toute perte de force vive dans le choc, le couteau doit être fixé très solidement au mouton.

4° On doit chercher à avoir une empreinte aussi longue que possible, afin de diminuer l'erreur relative sur la lecture, dont l'approximation absolue peut être fixée à $0^{mm},1$; en conséquence, le travail de chute doit croître avec la résistance du métal.

5° L'éprouvette doit être solidement maintenue sur l'enclume au moyen de griffes ou de colliers ; sa face supérieure doit être horizontale et l'emplacement de l'empreinte soigneusement poli.

Le couteau ne doit pas se déformer au choc ni s'égrener sur les arêtes.

6° Le seul résultat indépendant des divers éléments de l'épreuve étant le rapport du travail de chute au volume de l'empreinte, on doit toujours le calculer et l'enregistrer pour avoir la possibilité de faire des comparaisons.

TROISIÈME CLASSE

ÉTUDE DE LA DURETÉ ET DE LA FRAGILITÉ

CHAPITRE I

ÉPREUVE DE PLIAGE APRÈS ÉCROUISSAGE A FROID PAR POINÇONNAGE OU APRÈS INCISION

1° Les essais scientifiques destinés à apprécier la fragilité après écrouissage et la fissilité doivent étudier séparément ces deux défauts, de manière à déterminer les rapports qu'ils peuvent avoir entre eux.

2° On peut étudier la fragilité en pliant des barreaux dont les fibres extérieures ont été écrouies, mais ne présentent pas de fentes apparentes.

3° On peut étudier la fissilité en pliant des barreaux dont les fibres extérieures ont été incisées à angle aussi vif qu'il est possible de le faire d'une manière pratique et constante dans ses effets.

On doit noter la nature, la profondeur et la forme de l'incision, l'angle de flexion maximum du barreau, le rayon intérieur du congé, le poids et les hauteurs de chute du mouton.

4° Comme essai pratique, pour la réception des barreaux qui doivent subir le poinçonnage, on peut recommander le pliage des barreaux percés au poinçon.

On opère le poinçonnage dans les conditions indiquées précédemment pour l'essai de poinçonnage simple, puis on

soumet la barrette poinçonnée à un essai de pliage effectué soit à la main, soit à la machine.

5° Si on opère à la main, on saisit dans un étau la barrette ainsi percée jusqu'à 10 millimètres du bord du trou ; on frappe l'autre moitié à grands coups de marteau à main.

L'angle de flexion supporté par la barrette au moment de l'apparition de criques d'une importance déterminée (par exemple, d'un demi-millimètre d'ouverture) donne une mesure de la qualité que le métal présente à ce point de vue spécial.

6° On note si la bavure du poinçonnage a été placée à l'intérieur ou à l'extérieur pendant la flexion.

7° Si l'on adopte d'autres conditions d'essai que celles indiquées ci-dessus, on les note également.

8° On peut pratiquer également des épreuves de traction sur les éprouvettes poinçonnées et on apprécie la qualité du métal d'après la résistance et l'allongement observés.

QUATRIÈME CLASSE

ESSAIS DE FABRICATION

CHAPITRE I

ESSAIS DE FAÇONNAGE A FROID

Essai d'élargissement au mandrin. — *Épreuves pratiquées sur barrettes, portant des trous forés ou poinçonnés.* — 1° L'épreuve d'élargissement au mandrin des trous forés ou poinçonnés donne des renseignements intéressants sur la fissilité du métal.

2° On peut employer à cet effet, dans les essais sur les éprouvettes, des mandrins ayant une conicité de 1/10 (1 millimètre de diamètre par centimètre de hauteur).

3° L'essai est pratiqué ordinairement soit au marteau à devant, soit au pilon, sans relevé de vitesse; il est intéressant de noter ces observations, ne fût-ce qu'à titre de renseignement.

4° Il est indispensable de noter si le trou élargi a été obtenu à la mèche, par simple forage ou par poinçonnage.

Épreuves pratiquées sur diverses pièces finies. — 1° L'essai d'élargissement au mandrin est appliqué aussi sur certaines pièces finies, comme les frettes à canons et les moyeux de roues. Il est bon de noter les conditions d'exécution : conicité du mandrin, poids du mouton et nombre de coups ou pression développée, élargissement obtenu, etc.

2° On peut recourir d'autre part à l'épreuve de mandrinage pour apprécier la fissilité des barres en cuivre pour entretoises de foyers, en pratiquant un avant-trou de 6 millimètres de diamètre, et en y enfonçant un mandrin de 60° de conicité; on note l'importance des fentes produites au cours de l'essai.

Essai d'emboutissage. — 1° L'épreuve d'emboutissage à froid donne des renseignements intéressants sur la malléabilité des tôles.

2° Les épreuves à la main dépendent en grande partie de l'habileté de l'ouvrier, et n'ont de valeur comparative que si elles sont effectuées par le même opérateur.

Il est préférable d'opérer à la machine, surtout à la presse hydraulique qui donne un effort continu et bien approprié.

3° Il est bon d'adopter des conditions d'installation uniformes pour faciliter la comparaison.

4° Avec le fer et ses dérivés, on peut adopter la cuve de 20 centimètres de diamètre pour les épaisseurs inférieures à 3 millimètres, et la cuve de 30 centimètres pour les épaisseurs supérieures à 3 millimètres.

Pour les tôles de métaux mous, comme le cuivre, on peut conserver le diamètre uniforme de 20 centimètres.

Si on adopte des chiffres différents, il est nécessaire de le noter.

5° La malléabilité est appréciée par la flèche obtenue avant l'apparition des criques.

6° Il est bon que la presse employée soit munie d'un manomètre permettant d'apprécier l'effort développé.

Essais d'aplatissement et d'écrasement. — 1° L'épreuve d'aplatissement donne des renseignements intéressants sur la malléabilité du métal; il est bon, en pratiquant cet essai, d'en noter toutes les circonstances.

2° Pour les barres soudées destinées à la fabrication des rivets, on peut, en vue de faciliter la comparaison, choisir des ronds de hauteur égale au diamètre et les aplatir sous le pilon. On note la réduction de hauteur obtenue avant qu'il se produise aucune déchirure; on indique s'il s'agit d'un essai avant ou après trempe.

3° Dans l'essai d'écrasement au marteau pratiqué sur les échantillons plats pour les métaux mous par exemple, on note le rapport de la surface élargie qu'on peut obtenir à la surface initiale, et aussi le rapport des épaisseurs si la pièce présente une épaisseur uniforme.

CHAPITRE II

ESSAIS DE FAÇONNAGE A CHAUD SUR LES FERS ET ACIERS

Essais de pliage. — 1° Les essais normaux de pliage s'exécutent en une seule chaude.

2° Pour les tôles, les bandes d'essai ont une longueur de 250 millimètres et une largeur de 40 millimètres; elles sont pliées avec un rayon au plus égal à l'épaisseur de la tôle. Il est fait, soit un ou plusieurs pliages en sens inverse avec le même angle dans chaque sens, soit un ou plusieurs pliages à bloc suivis de redressements.

3° Pour les cornières, l'essai de pliage, qui se fait en ouvrant ou fermant les ailes, porte sur une longueur de 100 millimètres. Il est fait, soit un seul pliage, soit plusieurs en sens inverse faisant le même angle avec la position initiale de l'aile soumise au pliage.

4° Pour les profilés, on opère de même, après les avoir, s'il y a lieu, découpés en forme de cornière, pour la commodité de l'essai.

Essais de cintrage. — *Tôles.* — L'essai consiste à confectionner un manchon cylindrique dont la hauteur est égale à 25 fois l'épaisseur de la tôle.

Cornières et profilés. — L'essai consiste à confectionner un manchon cylindrique ou demi-cylindrique suivant le cas, en conservant une aile dans son plan primitif.

Essais d'emboutissage. — 1° L'essai d'emboutissage à chaud est effectué autant que possible à la presse dans les conditions indiquées pour l'emboutissage à froid.

2° La qualité du métal est appréciée d'après la flèche obtenue sur la cuve ayant le rayon déterminé pour les essais à froid.

Essais des crochets. — 1° Cet essai est exécuté généralement en prélevant des quantités de matière permettant d'obtenir par forgeage des éprouvettes rondes de 20 millimètres de diamètre pour le fer et de 16 millimètres pour l'acier.

2° Ces éprouvettes, chauffées à une température déterminée, subissent l'essai en une seule chaude.

3° Dans cet essai, le pliage se fait à 90°.

Essais de perçage. — 1° Pour tous les essais de perçage, les fers ronds sont ramenés à une épaisseur égale au tiers de leur diamètre primitif.

2° *Perçage d'un seul trou.* — Cet essai est exécuté en une seule chaude.

3° *Perçage de deux trous.* — La distance des centres des trous est égale au tiers de la largeur de la barre, s'ils sont percés suivant la largeur; elle est égale à leur diamètre augmenté de 10 millimètres, s'ils sont percés suivant la longueur. Cet essai est fait en une seule chaude ou en deux suivant que l'épaisseur du fer est inférieure ou supérieure à 60 millimètres. On peut accorder une chaude en plus si le perçage est suivi d'un pliage.

Essais de rabattement. — 1° Ces essais sont exécutés en une seule chaude.

2° *Fers ronds, carrés ou plats.* — La fente aura une longueur égale à une fois et demie le diamètre ou la largeur du fer ; elle n'est pas limitée par un trou.

3° *Profilés.* — La fente a une longueur égale à trois fois la hauteur du fer; elle est faite à froid et limitée par un trou également percé à froid.

Essais de soudabilité. — 1° Les essais de soudabilité se font de trois manières : par traction, perçage et pliage.

2° Dans les essais par traction, la partie soudée doit être placée, autant que possible, au milieu de la longueur utile.

3° Dans les essais par perçage, le trou est percé dans le plan de la soudure après qu'on a forgé en carré le barreau soudé; le diamètre du trou doit être égal à la largeur du barreau forgé en carré.

4° Dans les essais par pliage, le pliage est fait à froid, parallèlement au plan de soudure sur les barreaux non percés, et perpendiculairement à ce plan sur les barreaux ayant subi l'essai de perçage indiqué ci-dessus.

CINQUIÈME CLASSE

ESSAIS SPÉCIAUX PRATIQUÉS SUR CERTAINES PIÈCES FINIES

CHAPITRE I

ESSAIS DES FILS MÉTALLIQUES

Essais de traction. — 1° La longueur du bout à expérimenter est choisie de manière que la partie comprise entre les organes d'attache soit un peu supérieure à 1 mètre.

2° Les repères sont exactement distants de 1 mètre.

3° Il convient de recommander de n'essayer que des échantillons bien dressés, soumis préalablement à la plus petite tension initiale possible. Cette tension doit d'ailleurs être notée et indiquée en même temps que les résultats.

4° L'épreuve, dont la durée est variable avec la nature et la section du fil, est conduite de manière à éviter les chocs, les accroissements brusques d'efforts et autant que possible l'échauffement du métal.

5° L'essai à la traction est, autant que possible, exécuté à une température comprise entre 10° et 30°; dans le cas contraire, on note la température d'épreuve. Il en est de même pour les autres essais de pliage, enroulement, torsion, etc.

6° L'essai n'est considéré comme régulier et valable que si la rupture se produit entre les repères et à 10 millimètres au moins du point de repère le plus voisin.

Essais de pliage. — 1° L'essai de pliage est exécuté, les pliages sont définis et décomptés dans les conditions suivantes :

a) Un échantillon rectiligne de fil est serré dans des mordaches présentant des bords arrondis sous un rayon égal à quatre fois le rayon du fil.

b) Le premier pliage, correspondant à un angle de 90°, est obtenu en amenant le fil au contact de la face extérieure de l'une des mordaches. Le second pliage s'obtient en amenant le fil, par un mouvement de 180°, au contact de la face extérieure de la seconde mordache, ce mouvement comprenant un redressement de 90° et un pliage en sens inverse de 90°. Le troisième pliage ramène le fil au contact de la première mordache et ainsi de suite.

c) Le nombre des pliages est compté comme égal au nombre des contacts diminué ou non de un, selon que la rupture se produit avant ou après le retour dans le plan de serrage.

2° L'essai à la machine doit être préféré à l'essai à la main comme offrant plus de garanties de comparabilité et d'exactitude.

3° Les pliages et redressements successifs doivent être effectués par mouvements alternatifs aussi réguliers que possible et se succédant sans arrêt jusqu'à rupture.

4° La cadence à suivre est d'une demi-seconde environ pour le passage de la position initiale au premier contact, et de une seconde environ pour le passage d'un contact à l'autre à partir du premier, ce qui correspond à une vitesse angulaire de 180° par seconde.

5° Le serrage du fil doit être réduit au strict nécessaire; on arrête le glissement du fil au moyen d'un dispositif quelconque agissant à une certaine distance, 10 millimètres au moins, du point de pliage.

6° La traction de pliage est le dixième environ de la résistance maxima absolue à la traction exigée du fil.

Essais d'enroulement. — 1° L'essai à la machine doit être préféré à l'essai à la main comme donnant plus de garanties d'exactitude et de comparabilité.

2° L'enroulement et le déroulement qui lui succède sont exécutés d'un mouvement uniforme avec une vitesse angulaire d'environ 180° par seconde.

3° Pour éliminer l'influence de l'organe d'attache, l'examen du fil porte exclusivement sur les spires autres que la première, que celle-ci soit rompue ou non.

4° Le diamètre d'enroulement, variable avec la destination du fil, ne saurait être fixé ; il est toutefois désirable que ce diamètre soit toujours un multiple simple de celui du fil. Il doit être bien spécifié.

5° La traction d'enroulement et de déroulement est le dixième environ de la résistance maxima absolue à la traction exigée du fil.

6° Le nombre des spires peut être fixé uniformément à dix.

Essais de torsion. — 1° La longueur du bout à essayer est choisie de manière que la partie comprise entre les organes d'attache soit de 20 centimètres.

2° La torsion est exécutée d'un mouvement uniforme avec une vitesse angulaire de 180° environ par seconde.

3° L'essai n'est considéré comme régulier que si la rupture se produit à 10 millimètres au moins de l'organe d'attache le plus voisin.

4° La traction sous laquelle se fait l'épreuve est le dixième environ de la résistance maxima absolue à la traction exigée du fil.

CHAPITRE II

ESSAIS DES CABLES MÉTALLIQUES

Essais de traction. — 1° Avant de détacher du câble l'échantillon à essayer, le bout à tronçonner est fortement armé, à ses deux extrémités, d'une ligature d'au moins 25 millimètres de longueur.

2° La longueur d'épreuve est choisie de manière que la partie comprise entre les organes d'attache soit un peu supérieure à 1 mètre.

3° Les repères sont exactement distants de 1 mètre.

4° Le bout essayé doit être aussi rectiligne que possible; la tension initiale destinée à assurer le dressage est aussi faible que possible; elle est toujours notée en même temps que les résultats.

5° L'épreuve, dont la durée est variable avec le type de câble essayé, est conduite de manière à éviter les chocs, les accroissements brusques d'efforts et, autant que possible, l'échauffement du métal.

6° Il y a lieu de continuer à rapporter, suivant l'usage, la résistance totale au poids par mètre linéaire.

Toutefois, il est recommandé d'indiquer, en même temps que la résistance absolue et le poids par mètre, la composition du câble afin de permettre, au besoin, le calcul de la résistance par millimètre carré de la section des fils constituants.

7° En ce qui concerne la mesure de l'allongement, on peut se borner à considérer l'allongement relevé sous traction maxima.

8° En pratique, on n'opère guère en soumettant le câble, avant de le rompre, à une traction permanente sous charge réduite. Cependant cette méthode paraît présenter un certain intérêt, car elle permet de déterminer la proportion des fils rompus sous cette traction et elle peut donner, par suite, des indications utiles sur la répartition de l'effort.

Dans le cas où on l'adopte, il convient de maintenir la traction pendant cinq minutes au moins et de lui donner une valeur en rapport simple avec la résistance maxima absolue à la traction exigée du câble, en adoptant, par exemple, les huit ou les neuf dixièmes de cette résistance.

9° L'essai doit, autant que possible, être exécuté à une température comprise entre 10 et 30°; dans le cas contraire, on note la température d'épreuve.

Essais de souplesse. — 1° La souplesse peut s'évaluer :

a) Soit en mesurant l'effort de traction à faire subir à un bout de câble plié en son milieu sur un cylindre horizontal de diamètre donné, pour que la distance intérieure des deux brins, mesurée dans le plan horizontal inférieurement tan-

gent au cylindre, ne soit pas supérieure de plus de 1 millimètre au diamètre dudit cylindre ;

b) Soit en mesurant l'effort de traction à exercer sur le brin libre d'un bout de câble enroulé sur un cylindre de diamètre donné, pour qu'il y ait partout contact des spires et du cylindre.

La connaissance de ces efforts et des diamètres permet d'évaluer la souplesse absolue.

2° La souplesse relative ne peut s'évaluer que si on a soin de joindre à ces deux quantités l'indication de la résistance maxima à la traction et la composition du câble.

3° La souplesse peut être évaluée également par des essais divers comme pliages, enroulements, déroulements, torsions, etc.

CHAPITRE III

ESSAIS DES CHAÎNES

Essais de traction graduée. — *Essais pratiqués sous charge modérée.* — 1° L'effort de traction modérée auquel on soumet les chaînes, sur toute leur longueur, doit avoir une valeur variable suivant la nature et les dimensions des chaînes ; cet effort est souvent le double de la charge prévue en service.

Pendant que la chaîne est soumise à cet effort, on examine soigneusement les maillons et on vérifie qu'ils ne présentent aucun défaut de nature à nuire à la sécurité de l'emploi ; on doit également mesurer l'allongement total.

2° La durée de l'épreuve doit être de cinq minutes au moins.

Essais poussés jusqu'à rupture. — 1° Le bout à essayer a une longueur telle que la partie soumise aux efforts de traction soit, autant que possible, de dix maillons.

2° On peut toutefois diminuer le nombre de maillons pour les chaînes de fortes dimensions.

3° Le bout essayé doit être aussi rectiligne que possible ; la tension initiale destinée à assurer le dressage est également aussi faible que possible ; elle est toujours notée en même temps que les résultats.

4° On doit, s'il est nécessaire, soutenir les maillons par un dispositif convenable.

5° On mesure la déformation des maillons sous diverses charges, et on note surtout la charge à laquelle ils commencent à se déformer d'une manière permanente.

6° L'épreuve, dont la durée est variable avec la nature de la chaîne, est conduite de manière à éviter les chocs, les accroissements brusques d'effort et, autant que possible, l'échauffement du métal.

7° La température est, autant que possible, comprise entre 10 et 30° ; dans le cas contraire, on note la température d'épreuve.

CHAPITRE IV

ESSAIS DES RIVETS

Ces essais peuvent être de deux sortes :

Premier mode d'essai. — Avec des morceaux pris dans les barres destinées à produire les rivets, on fabrique un certain nombre de rivets à tête bouterollée non fraisée, et on rive au marteau ou mécaniquement, avec les rivets ainsi fabriqués, des bandes de tôle dont la somme des épaisseurs est au moins égale à deux fois le diamètre des rivets.

Les rivets doivent être espacés de quatre diamètres au plus.

On introduit alors entre les deux bandes de tôle, et dans l'intervalle des deux derniers rivets d'un bout, une tranche

dont le biseau forme un angle déterminé et sur laquelle on frappe, de manière à séparer les tôles ; on agit de même de proche en proche, dans chaque intervalle de rivets, jusqu'à l'autre bout de la bande.

Deuxième mode d'essai. — On assemble, au moyen d'un des rivets à essayer, deux touches en acier qui se croisent. La rivure faite, on pose la touche supérieure sur les bords de la rainure d'une enclume spéciale et on place sur la touche inférieure une chasse à fourche sur laquelle on frappe à coups de marteau.

NOTA. — Il est essentiel que les touches en acier soient très résistantes.

CHAPITRE V

ESSAIS DES TUYAUX ET TUBES

Essai de cintrage. — Dans cet essai, les tubes remplis de résine sont courbés à une flèche déterminée, ou enroulés sur un mandrin de diamètre donné.

Essai d'élargissement au mandrin. — Il est intéressant de spécifier toutes les circonstances de l'essai, notamment le profil exact du mandrin, le poids du marteau, le nombre de coups, l'élargissement obtenu, etc.

Essais d'écrasement et d'aplatissement. — Les tubes sont soumis à une épreuve d'écrasement et d'aplatissement au marteau qui a pour but de vérifier la malléabilité ou la raideur du métal, et en même temps la soudure pour les tubes obtenus par ce procédé.

Essais de retournement. — L'épreuve de retournement est destinée à faire apprécier la malléabilité du métal.

Le tube est fendu suivant une génératrice, et le métal est ensuite replié sur lui-même, de façon à ce que la surface intérieure primitive devienne la surface extérieure du nouveau tube.

Essais de rabattement de la collerette. — L'épreuve de rabattement de la collerette effectuée sur les tubes en fer, en acier, en laiton ou en cuivre, est destinée à faire apprécier la malléabilité du métal.

Pour les tubes de chaudières en fer et en laiton, cette épreuve est exécutée à la main sur le bord d'une enclume et à petits coups de marteau; ce mode opératoire ne paraît pas appeler d'autre unification que la fixation des diamètres des collerettes en rapport avec les épaisseurs et les diamètres des tubes.

Pour les tubes à fumée en métal doux et les tuyaux en cuivre de toute nature, il est préférable de fixer pour cette épreuve des conditions d'exécution qui la rendent indépendante de l'habileté de l'opérateur. La collerette du diamètre exigé doit être obtenue en deux opérations seulement, au moyen de deux mandrins de formes appropriées qu'on enfonce successivement à coups de marteau.

CHAPITRE VI

ESSAIS A LA PRESSION HYDRAULIQUE

Épreuve des appareils à vapeur. — 1° Tout appareil à éprouver doit être complètement rempli d'eau.

2° Il importe que la pression y soit produite progressivement et sans à-coups.

3° Le manomètre doit accuser, sans risque d'erreur, la pression qui s'exerce dans l'appareil même.

4° Les joints nécessaires pour l'essai doivent avoir été préparés selon les règles et de manière à ne pas fuir.

5° Il faut que les surfaces de l'appareil soient entièrement à nu, afin d'en rendre toutes les parties accessibles aux constatations ci-après, qui sont essentielles à l'opération.

Ces constatations sont de deux sortes :

a) Les unes consistent à examiner l'état des assemblages et des surfaces métalliques. Pour les surfaces extérieures, cet examen se fait pendant l'essai hydraulique, dont on maintient la pression autant qu'il est nécessaire. L'examen des surfaces et pièces intérieures doit avoir lieu, si possible, avant et après l'essai.

b) Les autres constatations sont relatives aux déformations que la pression fait subir à l'appareil. Il importe de reconnaître, d'une part, si les déformations temporaires dues à la pression d'épreuve sont suffisamment petites, symétriques et bien réparties, et, d'autre part, si l'appareil revient convenablement à ses cotes primitives une fois la pression disparue. Si, pour ce double objet, l'on ne peut recourir aux procédés de mesure, précis au centième de millimètre près, qui ont été employés dans certaines expériences, il faut du moins faire comparativement avant, pendant et après l'essai hydraulique, sur des emplacements bien repérés, une série de mesures soigneusement notées ou, ce qui vaut mieux, matérialisées par des gabarits. Il importe notamment de vérifier le bombement des fonds plats ou peu bombés.

Essais des tuyaux, tubes, obus, etc. — La pression hydraulique fournit un contrôle utile de la résistance de certaines pièces, telles que les tuyaux, les tubes, les obus, etc.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

1° **Résultats fournis par l'analyse chimique.** — La composition chimique d'un métal ferreux est sensiblement formée des mêmes éléments en proportion variable.

On a vu plus haut comment on procède à l'analyse.

Or, les métalloïdes et les métaux qui constituent par leur réunion ou leur combinaison le fer, l'acier ou la fonte jouent un rôle dont l'importance est loin d'être égale. Il est donc nécessaire de les examiner séparément.

Carbone. — Le carbone exerce, comme il a été dit, une influence prépondérante sur les propriétés des aciers.

Suivant leur teneur plus ou moins élevée en carbone, les métaux considérés conviennent pour tels ou tels usages industriels. C'est aussi suivant la proportion plus ou moins grande de cet élément que l'on peut pratiquement et avec une approximation suffisante classer les aciers en six catégories :

Acier extra-doux.....	0,10 0/0	de carbone combiné
— doux.....	0,20 0/0	—
— mi-doux.....	0,30 0/0	—
— mi-dur.....	0,40 0/0	—
— dur.....	0,50 0/0	—
— extra-dur.....	0,60 0/0	—

Cette nomenclature ne doit pas s'entendre toutefois dans un sens trop absolu. En effet, la variation, d'autres éléments constitutifs, tels que le silicium, peut entraîner une modification dans les qualités de l'acier, et classer celui-ci dans une catégorie autre que celle à laquelle il appartiendrait par sa seule teneur en carbone.

La dureté de l'acier croît, comme on le voit, avec la proportion en carbone combiné (carbone de trempe et cémentite). L'influence du carbone de trempe sur la dureté est plus importante que celle de la cémentite. Cette dureté est donc

augmentée par la trempe dans l'eau ; elle est, au contraire, diminuée par le recuit.

Tout en augmentant la résistance à la traction, le carbone de trempe diminue la malléabilité et accroît la fragilité.

Le fer est d'autant plus malléable qu'il est plus pur, c'est-à-dire qu'il contient moins de carbone.

Manganèse. — L'accroissement successif de manganèse dans le métal ne détermine pas une augmentation correspondante de la dureté, car celle-ci s'élève d'abord pour diminuer ensuite et s'élever à nouveau.

Pour une teneur de 0,38 0/0 de carbone, on a constaté que le métal le plus dur contenait 1,38 de manganèse. Une proportion de 5 0/0 de manganèse augmente la dureté comme le ferait 1 0/0 de carbone.

Le manganèse améliore l'acier pour le travail total de déformation et accroît la résistance dans les efforts sans choc. De même que le carbone, il rend les aciers rigides et élastiques.

Il s'associe en toute proportion au fer pour former un alliage. La pureté, la résistance, la ténacité et la fluidité du produit augmentent avec la proportion de manganèse.

Il est à remarquer qu'une fonte très manganésée est blanche, cassante et présente à sa surface des facettes miroitantes.

Phosphore. — Ce métalloïde augmente la dureté, mais moins que ne le fait une même quantité de carbone; il n'agit pas sensiblement sur la trempe. Il exerce une influence indéniable sur les propriétés mécaniques du fer et de l'acier. Une teneur un peu élevée en phosphore diminue la résistance à la traction. Des vibrations assez faibles déterminent la rupture de fers ou d'aciers phosphoreux, et cette influence nuisible du métalloïde est encore plus grande à basse température.

On dit généralement, et avec raison, que l'acier phosphoreux est *cassant à froid.* La fragilité est d'autant plus grande que la proportion de carbone combiné est plus considérable. Cela résulte d'une modification dans la texture. Les grains deviennent plus gros ; or il est reconnu que, plus

les cristaux d'un corps sont grands, plus ce corps est fragile.

L'action du phosphore diffère suivant la nature du métal. Avec l'acier, la teneur limite admise ne doit pas dépasser 0,100 à 0,120 0/0 s'il s'agit d'acier à rails, et moins encore dans le cas de tôles de construction (0,050 à 0,100) et de tôles de chaudières (0,030 à 0,040) ; elle peut être reculée à 0,200 0/0 pour le fer sans qu'il y ait d'inconvénient pour son utilisation dans les cas ordinaires de la pratique.

Une trop forte proportion de phosphore donne aux rails une structure feuilletée particulière qui permet de reconnaître, même sans analyse, la présence de ce métalloïde.

Ce corps augmente la fluidité de la fonte, mais la rend fragile et diminue sa ténacité.

A teneur convenable, il atténue les effets fâcheux qu'exerce le soufre sur les propriétés du fer à chaud ; il le rend plus facile à souder et à travailler au feu.

Silicium. — La dureté du métal croît avec la teneur en silicium, mais moins toutefois qu'avec la même proportion en carbone. Une mèche d'acier perfore facilement un ferro-silicium contenant 16 0/0 de silicium.

Le silicium ne paraît pas avoir d'influence sur la trempe de l'acier. Une trop grande quantité rend le métal rouverin et incapable de supporter le laminage. Contrairement aux autres éléments, le silicium diminue l'aptitude de l'acier à prendre la trempe.

La présence du silicium relève le point de fusion de la fonte. Le produit possède alors la propriété de se solidifier brusquement et d'un seul coup sans passer par l'état pâteux.

Avec le fer, le silicium produit à peu près les mêmes effets que le soufre pour le travail à chaud ; mais à froid il diminue sa ténacité et sa ductilité.

Soufre. — Le soufre a une grande affinité pour le fer ; l'expérience classique du volcan de Lémeri le prouve surabondamment.

Ce métalloïde abaisse la température de fusion du fer. Il n'altère pas la résistance ni l'allongement, mais il rend ce métal rouverin à la température du rouge cerise, ce qui cons-

titue un grave inconvénient pour le travail de forgeage. En outre, le fer sulfureux est cassant vers 360°.

Il rend aussi l'acier rouverin. Il est inégalement réparti dans les lingots où il tend à occuper la partie supérieure.

La présence de ce corps en quantité notable rend la fonte cassante et impropre au moulage.

Éléments divers. — D'autres éléments que ceux qui viennent d'être passés en revue peuvent également exercer une influence avantageuse ou fâcheuse. Dans le premier cas, ils sont généralement introduits à dessein dans la fabrication en vue d'obtenir certaines qualités; ils constituent alors des produits spéciaux. Dans le second cas, ils n'existent qu'accidentellement.

Le tableau ci-après donne quelques analyses de fers, d'aciers et de fontes.

	FER de Suède	FER spéculaire	ACIER au creuset	ACIER BESSEMER anglais	FONTE BLANCHE de Suède	FONTE GRISE Bessemer	FONTE BLANCHE grenue	FONTE NOIRE	FONTE de 2e fusion
Carbone combiné	0,05	5,04	1,32	0,51	3,86	0,64	3,60	0,43	0,20
Graphite	»	»	»	»	0,12	2,76	0,20	3,30	3,90
Manganèse	0,07	5,75	0,23	1,03	0,29	2,22	»	»	»
Phosphore	0,02	»	0,04	0,05	0,03	0,06	0,75	0,20	0,16
Silicium	0,02	0,41	0,09	0,08	0,15	2,23	1,25	0,84	0,28
Soufre	0,01	0,08	0,05	0,06	0,02	0,02	traces	»	»

2° **Résultats fournis par les essais.** — Les essais donnent des résultats qui, comme ceux fournis par l'analyse, varient avec chaque nature de produits. Ils doivent, au point de vue de la réception, satisfaire à des conditions déterminées, mais les clauses imposées sont parfois différentes suivant les cahiers des charges. On conçoit dès lors qu'il devient difficile d'établir une uniformité dans les chiffres que l'on doit adopter. Le mieux que l'on puisse faire est de s'inspirer des conditions exigées par les grandes administrations.

Voici quelques renseignements utiles extraits du cours de matériaux de construction de l'École des Ponts et Chaussées (**P. Debray**).

RÉSULTATS MOYENS DE TOLES

Les barrettes découpées dans les tôles avaient 30 millimètres de largeur pliquent qu'à des barrettes reconnues saines après essai. En général, les la tôle et pour chaque épaisseur considérée.

ÉPAISSEUR DES TOLES	FER N° 2			
	RÉSISTANCE		ALLONGEMENT	
	Longueur	Travers	Longueur	Travers
millimètres	kg.	kg.	0/0	0/0
2 et au-dessus	36,80	33,20	3,65	0,60
De 3 exclu à 5 inclus	33,20	30,50	3,95	1,30
5 à 7	31,90	29,95	4,40	2,00
7 à 9	31,25	29,65	4,85	2,70
9 à 11	30,75	29,50	5,30	3,30
11 à 13	30,20	29,30	5,80	3,80
13 à 15	30,00	29,15	6,30	4,00
15 à 17	»	29,00	»	4,10
17 à 19	»	»	»	»
19 à 21	»	»	»	»
21 à 23	»	»	»	»

: FER ESSAYÉES A LA TRACTION

200 millimètres de longueur utile. Les chiffres ci-dessous ne s'ap-
)yennes ont été calculées sur 20 éprouvettes pour chacun des sens de

FER N° 3				FER N° 4			
RÉSISTANCE		ALLONGEMENT		RÉSISTANCE		ALLONGEMENT	
Longueur	Travers	Longueur	Travers	Longueur	Travers	Longueur	Travers
kg.	kg.	0/0	0/0	kg.	kg.	0/0	0/0
35,30	29,75	6,90	1,30	36,35	32,35	8,15	1,97
35,30	29,40	7,15	1,95	35,45	31,30	9,90	3,30
35,10	29,10	7,50	2,65	34,75	30,60	11,05	4,55
34,65	29,05	7,90	3,25	34,15	30,20	11,70	5,65
34,10	28,95	8,35	3,80	33,55	30,00	11,95	6,65
33,40	28,85	8,80	4,35	32,95	30,00	11,95	7,45
32,60	28,65	9,40	4,80	32,45	30,05	11,90	8,15
31,80	28,45	10,20	5,15	32,15	30,10	11,70	8,65
31,05	28,25	11,15	5,30	31,90	30,35	11,35	9,00
»	»	»	»	31,60	30,50	10,90	9,20
»	»	»	»	31,35	30,60	10,30	9,30

RÉSULTATS MOYENS DE TOLES

Les barrettes découpées dans les tôles avaient 30 millimètres de largeur pliquent qu'à des barrettes reconnues saines après essai. En général, les la tôle et pour chaque épaisseur considérée.

ÉPAISSEUR DES TOLES	FER N° 5			
	RÉSISTANCE		ALLONGEMENT	
	Longueur	Travers	Longueur	Travers
millimètres	kg.	kg.	0/0	0/0
2 et au-dessus	38,70	33,80	15,40	2,50
De 3 exclu à 5 inclus	26,65	32,80	15,85	4,65
5 à 7	35,25	31,90	16,05	6,50
7 à 9	34,40	31,20	16,15	7,95
9 à 11	33,75	30,80	16,05	9,15
11 à 13	33,20	30,60	15,85	9,90
13 à 15	32,90	30,60	15,55	10,25
15 à 17	32,60	30,80	15,05	10,30
17 à 19	32,55	31,15	14,65	10,15
19 à 21	32,80	31,70	14,30	9,95
21 à 23	33,20	32,30	13,75	9,70

DE FER ESSAYÉS A LA TRACTION

et 200 millimètres de longueur utile. Les chiffres ci-dessous ne s'ap-
noyennes ont été calculées sur 20 éprouvettes pour chacun des sens de

FER N° 6				FER N° 7			
RÉSISTANCE		ALLONGEMENT		RÉSISTANCE		ALLONGEMENT	
Longueur	Travers	Longueur	Travers	Longueur	Travers	Longueur	Travers
kg.	kg.	0/0	0/0	kg.	kg.	0/0	0/0
»	»	»	»	»	»	»	»
36,05	33,70	13,90	5,55	36,15	33,00	20,20	10,55
35,25	32,75	16,35	7,60	34,45	31,70	19,75	11,25
34,58	32,00	18,25	9,30	33,70	31,30	19,53	12,05
33,95	31,40	19,40	10,75	33,20	31,25	19,70	12,75
33,40	30,95	20,15	12,05	32,95	31,35	20,00	13,55
33,00	30,95	20,40	13,10	32,75	31,50	20,50	14,38
32,80	31,30	20,50	13,85	32,55	31,60	21,25	15,30
32,75	31,90	20,60	14,25	32,40	31,70	22,00	16,20
33,20	32,65	20,75	14,30	32,30	31,75	22,85	17,20
33,82	33,45	20,85	13,85	32,20	31,85	23,85	18,15

EXTRAIT DU CAHIER DES CHARGES GÉNÉRAL DU MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

ART. 20. — **Fonte.** — La fonte doit être exclusivement de deuxième fusion et de la meilleure qualité; elle présente, dans sa cassure, un grain gris serré, régulier avec arrachements. Elle est exempte de gerçures, gravelures, soufflures, gouttes froides et autres défauts susceptibles d'altérer sa résistance et la netteté de forme des pièces.

Sauf pour les pièces à couler en coquille, elle doit être à la fois douce et tenace, facile à entamer au burin et à la lime, susceptible d'être refoulée au marteau. Toutes les pièces de fonte doivent être soigneusement moulées sur modèles spéciaux à la charge de l'entrepreneur; elles sont, après le moulage, ébarbées avec le plus grand soin au burin et à la lime.

Les trous de boulons ne doivent pas venir de fonte, mais être percés.

Les fontes doivent résister aux essais suivants au choc et à la traction.

Essai au choc. — Les éprouvettes sont des barreaux de $0^{m},20$ de longueur et de $0^{m},04$ d'équarrissage. Une éprouvette, placée horizontalement sur deux couteaux en acier espacés de $0^{m},16$, doit supporter, sans se rompre, le choc d'un mouton de 12 kilogrammes tombant librement d'une hauteur de $0^{m},40$ au milieu de l'intervalle des points d'appui.

L'enclume supportant les couteaux présente un poids d'au moins 800 kilogrammes.

Essai à la traction. — Les éprouvettes sont des barreaux ronds ayant 600 millimètres carrés de section, soit un diamètre de $27^{mm},64$, sur une longueur de 200 millimètres. Une éprouvette doit supporter, sans se rompre, un effort de traction de 9.000 kilogrammes, soit 15 kilogrammes par millimètre carré.

Si, dans les essais, une éprouvette, ne présentant pas de défaut local apparent, ne remplit pas les conditions prescrites, toutes les pièces venant de la même coulée peuvent être refusées sans autre examen. Si une éprouvette présentant un défaut local apparent vient à se rompre, on fait l'essai de deux nouvelles éprouvettes, et, si l'une d'elles vient à se rompre, le refus de la coulée est définitif.

Les pièces et les éprouvettes provenant d'une coulée portent, venu de fonte, le numéro de cette coulée. Les éprouvettes sont, de plus, poinçonnées à la marque de l'Administration.

Le représentant de l'Administration peut assister à la coulée des pièces et déterminer le moment où les éprouvettes doivent être fondues.

Art. 21. — **Fers.** — Tous les fers sont bien corroyés, doux, non cassants, malléables à froid, nerveux, d'un grain homogène, sans pailles, gerçures, brûlures ni autres défauts.

Les tôles, fers profilés et larges plats sont, en outre, parfaitement laminés, soudés et calibrés. On refuse les pièces qui se fendent ou s'ouvrent sous le poinçon, ou qui se déchirent quand on voudra les courber, infléchir ou entailler.

Dans le travail de la machine à percer, de la machine à raboter ou de la cisaille, les fers doivent presenter dans leur tranche une coupe grasse.

Essais. — Des essais à froid servent à vérifier la résistance des fers à la rupture et leur faculté d'allongement. Ils sont faits dans les conditions suivantes :

Pour les tôles, fers profilés et larges plats, les éprouvettes seront des barrettes découpées dans un certain nombre de pièces prises au hasard dans chaque livraison; ces barrettes sont façonnées de manière que la partie prismatique sur laquelle est mesuré l'allongement ait toujours une longueur de $0^{m},20$, se raccorde avec les extrémités de l'éprouvette par des congés de $0^{m},10$ de rayon au moins, et présente une section rectangulaire dont l'un des côtes a $0^{m},030$ de largeur, et l'autre l'épaisseur de la pièce. Par exception, pour les tôles minces au-dessous de $0^{m},005$ et pour les cornières de moins de $0^{m},05$ de côté, la largeur de la barrette d'essai est réduite à $0^{m},020$.

On a soin, pour les tôles, d'expérimenter un nombre égal de barrettes dans le sens du laminage et dans le sens perpendiculaire.

On considère comme larges plats les tôles d'une largeur inférieure à $0^{m},30$.

Pour les fers forgés, les éprouvettes sont des barres prismatiques de $0^{m2},0006$ de section et de $0^{m},20$ de longueur, ou des barres cylindriques tournées dont la partie sur laquelle est mesuré l'allongement a une longueur égale à huit fois le diamètre, sans pourtant être inférieure à $0^{m},10$.

Les éprouvettes sont soumises, au moyen de poids agissant directement ou par l'intermédiaire de leviers tarés avec soin, à des efforts de traction croissant progressivement jusqu'à ce que la rupture ait lieu.

Les résultats obtenus doivent être au moins égaux à ceux du tableau ci-après :

DÉSIGNATION DES FERS	CHARGE MINIMA de rupture par mm² de section	ALLONGEMENT minimum de rupture
	kilogrammes	0/0
Tôles { en long	32	8
Tôles { en travers	28	3,5
Fers profilés et larges plats	32	8
Fers forgés { ordinaires	30	9
Fers forgés { forts	32	15
Fers forgés { forts supérieurs	36	20

La limite d'élasticité est comprise entre la moitié et les deux tiers de la charge de rupture.

Rivets. — Les rivets sont en fer fort supérieur. Ce fer est ductile et tenace et présente, sous le rapport du nerf, de la finesse et de la propreté, toutes les apparences du fer le plus résistant. Il doit, en outre des essais prescrits pour les fers forgés, être capable de supporter l'épreuve suivante : on prend, dans les tiges destinées à la confection des rivets, des bouts de 20 centimètres (0m,20) de longueur, et on les enfonce dans des blocs de bois de chêne préalablement percés pour les recevoir ; on les frappe latéralement sur la partie supérieure, de manière à les infléchir sous un angle de 45°, et on les redresse ; on répète une seconde fois le même essai ; il ne doit se produire ni cassure, ni crique, ni détérioration quelconque.

Les rivets doivent être obtenus en un seul coup de la machine à étamper, sans que le fer ait été surchauffé ou brûlé. Les têtes sont bien centrées et d'équerre à la tige ; celle-ci est droite et d'un diamètre uniforme, avec une tolérance de 1 millimètre au plus sous la tête.

Pour vérifier si le fer est propre à la rivure, on pose à chaud un certain nombre de rivets : le fer doit s'étaler bien uniformément en forme de tête sans se fendiller. La rivure faite, les têtes ne doivent pas se détacher, quels que soient les chocs auxquels on soumet les tôles autour des rivets.

Boulons. — Les boulons sont en fer fort supérieur, capable de résister aux mêmes essais que le fer pour rivets. Les boulons sont parfaitement calibrés. Les têtes sont refoulées dans la masse et non rapportées. On n'admet pas les écrous qui sont découpés dans des plates-bandes laminées.

Le taraudage des boulons et des écrous doit être net, soigné et bien uniforme. Les boulons dont le filet est égrené sont refusés.

Les boulons servant à l'assemblage des métaux entre eux sont

tournés sur toute leur étendue. Les boulons servant à assembler les charpentes ont la tête carrée et une rondelle sous l'écrou.

Les rondelles sont parfaitement unies, planes et sans bavures.

ART. 22. — **Acier.** — Les pièces laminées sont exactement calibrées, exemptes de pailles, soufflures, criques ou gerçures : les tranches cisaillées à froid doivent être grasses et unies, sans déchirures ni éclats de métal.

On refuse les pièces qui se fendent ou s'ouvrent sous le poinçon, qui se déchirent ou donnent des criques quand on veut les courber, ployer ou cisailler, ou y exécuter un travail quelconque de forage ou de rivure.

Essais de traction. — Les prescriptions relatives au nombre, au choix et à la façon des éprouvettes de fer sont applicables à l'acier.

Les résultats obtenus doivent être au moins égaux à ceux du tableau ci-après :

DÉSIGNATION DES PIÈCES	CHARGE MINIMA de rupture par mm² de section	ALLONGEMENT minimum de rupture
	kilogrammes	0/0
Tôles { en long / en travers	42	22
Barres profilées en long / Larges-plats en long		
Barres pour rivets	38	28

La limite d'élasticité est comprise entre la moitié et les deux tiers de la charge de rupture.

Essais de ployage. — Des barrettes de 0m,20 de longueur et de 0m,03 de largeur, découpées dans une partie quelconque d'une pièce d'acier, soit avant, soit après un travail quelconque de cisaillement, forgeage ou rivure, doivent pouvoir être ployées à froid par le milieu, de telle sorte que les deux bouts viennent se toucher et que le plus grand écartement entre les deux faces extérieures de la barrette ployée soit réduit à trois fois son épaisseur, sans présenter de traces de criques.

Essais de trempe. — Des barrettes semblables, chauffées au rouge cerise un peu sombre, puis trempées dans un volume impor-

tant d'eau à 28°, doivent pouvoir supporter les mêmes épreuves sans présenter de traces de criques.

Essais de ployage sur trous poinçonnés. — Des barrettes de 0m,20 de longueur et de 0m,06 de largeur sont, avant découpage, poinçonnées en leur milieu d'un trou de 0m,02 de diamètre ; elles doivent ensuite être ployées à froid d'un angle de 45° sans présenter de traces de criques.

Prescriptions spéciales aux rivets. — Les rivets d'acier sont fabriqués comme les rivets de fer.

Afin de s'assurer de la malléabilité de l'acier pour rivets, des morceaux de barres ayant une longueur double du diamètre, et chauffés uniformément jusqu'à la température de l'emploi, sont frappés debout et réduits au tiers de leur longueur. Il ne doit pas, dans ce travail, se produire de fissure.

Pour vérifier si le métal est propre à la rivure, on recourt aux mêmes épreuves que pour les rivets en fer.

ART. 23. — **Nombre maximum d'essais. — Dispenses de certains essais. — Substitution ou addition éventuelle d'autres essais.** — Le devis particulier indique le nombre maximum des essais de chaque espèce.

Il désigne ceux des essais prévus par les articles 20, 21 et 22 qui ne sont pas exigés eu égard à la nature et à l'importance des ouvrages à construire.

Il indique, s'il y a lieu, d'autres essais qui pourront être éventuellement substitués ou ajoutés à ceux prévus aux articles 20, 21 et 22.

CHAPITRE XXIV

ACIERS SPÉCIAUX

L'industrie sidérurgique fabrique des aciers jouissant de propriétés particulières et qui ne sont autres que des alliages formés de fer et d'un ou de plusieurs métaux. Ces produits, désignés sous le terme général d'aciers spéciaux, semblent devoir dans l'avenir se substituer pour une partie de leurs usages aux aciers au carbone. On va examiner successivement les principaux d'entre eux.

Aciers au nickel. — Des lots remarquables d'aciers au nickel provenant des usines Schneider et C^ie^, Firminy, Châtillon-Commentry-Neuves-Maisons, etc., ont figuré à l'Exposition universelle de 1900.

Ces produits jouissent d'une grande faveur dans l'industrie automobile. On conçoit fort bien qu'en pareille matière il importe grandement de se servir de métaux susceptibles de résister à des vibrations et à des chocs continuels. Dans les vitesses souvent énormes qu'acquièrent les voitures motrices, la rupture d'un organe peut amener facilement une catastrophe; il est donc indispensable de se prémunir contre un tel aléa en n'adoptant que des matériaux résistants, quelque soit d'ailleurs leur prix de revient.

Les aciers à teneur faible (jusqu'à 7 ou 8 0/0 de nickel) prennent la trempe d'une façon énergique et se laissent travailler; ces produits conviennent comme pièces de machines. Les aciers à 10 ou 12 0/0 de nickel ont une limite élastique et

une résistance élevées ; ils se trempent encore énergiquement. On s'en sert comme organes destinés à résister à de grands efforts. Les aciers à 20 ou 25 0/0 de nickel présentent une résistance et un allongement remarquables ; la trempe les adoucit et ils sont pratiquement inoxydables. Ils se travaillent plus difficilement que les aciers au carbone. Leur emploi est tout indiqué dans les pièces fortement embouties devant subir l'action du feu ou sujettes à des détériorations. Les aciers à haute teneur en nickel ont une grande dureté ; leur limite élastique est élevée. On s'en sert pour la confection de ressorts. L'alliage Invar à 36 0/0 et l'alliage Platinite à 48,50 de nickel des usines d'Imphy peuvent servir dans les lampes à incandescence.

La Compagnie des Forges de Châtillon-Commentry et Neuves-Maisons fabrique des aciers à 25 0/0 de nickel qui, d'après les renseignements qu'elle fournit, présentent les propriétés suivantes :

DESIGNATION	E	R par mm²	A 0/0	USAGES
Tôles de 3 millimètres				
Long naturel	53,8	87,8	40	
Travers naturel	53	89,8	38,5	
Long trempé	43,2	84,5	45,5	Ressorts
Travers trempé	42,7	85,3	45	
Tôles de 2 millimètres				et câbles
Long naturel	51,2	90,3	38	supportant
Travers naturel	50,4	89,8	33,5	
Long trempé	39,6	84,8	37	de
Travers trempé	39,5	83,5	30	
Tôles de 1mm,5				fortes
Long naturel	55,3	90,5	30	
Travers naturel	54,7	83,7	28	charges
Long trempé	33,9	79,5	41,5	
Travers trempé	33	73,1	36,5	

Voici quelques chiffres fournis par les aciéries Schneider

et Cie; ces résultats proviennent d'essais à la traction faits avant et après traitement sur les barreaux de 13,8 × 100 :

TENEUR EN NICKEL	TRAITEMENT	E par mm²	R par mm²	A 0/0	USAGES
	Acier à 40 kilogrammes (doux)				
Acier à 1 0/0 Ni...	Recuit à 900°	26	40	30	Pièces de machines, pièces cémentées, cônes, cuvettes, mouvements, pédaliers, axes, tôles, rivets.
	Trempé à l'eau à 900°	34	55	18	
	Acier à 50 kilogrammes (mi-doux)				
Acier à 3 0/0 Ni...	Recuit à 900°	35	50	25	Produits ordinaires de forge (tôle, profilés, rivets), pièces de machines.
	Trempé et recuit	48	56	20	
	Acier à 70 kilogrammes (dur)				
	Recuit à 900°	42	60	20	Cadres, arbres, vilebrequins, essieux, manivelles, tiges de pistons.
	Trempé et recuit	58	68	15	
	Acier à 60 kilogrammes (mi-dur)				
Acier à 5 0/0 Ni...	Recuit à 900°	44	62	20	Mêmes usages que le précédent.
	Trempé et recuit	62	72	15	
	Acier à 60 kilogrammes (mi-dur)				
	Recuit à 900°	52	72	15	Bouts d'essieux, fusées, moyeux, pignons, tiges de pompe, étriers, etc.
	Trempé et recuit	75	85	12	
Acier à 12 0/0 Ni..	Recuit à 900°	72	140	6	Arbres divers, pistons, tiges de freins, clavettes, tubes à haute résistance.
	Recuit à 525°	80	95	12	

La Compagnie du chemin de fer de New-York Central and Hudson a mis à l'essai un lot important de rails en acier au nickel sur une partie de ses voies où il y a une assez forte pente et un trafic intense. Ces rails, dont la composition chi-

mique est la suivante :

$$C = 0{,}42,\ Si = 1{,}02,\ Mn = 0{,}79,\ Ni = 3{,}38,\ P = 0{,}09,$$

ont été fabriqués par les aciéries Carnegie.

Dans la construction du pont cantilever de Blackwell's Island (New-York), dont les deux travées ont respectivement 360 et 300 mètres, on s'est servi d'acier au nickel.

Aciers au manganèse. — Ces aciers sont bien moins employés que les aciers au nickel, mais ils offrent sur ces derniers l'avantage d'être d'un prix de revient inférieur.

Pour fabriquer l'acier à faible teneur en manganèse (à 5 0/0 par exemple), on a recours au four Martin. Pour les aciers à haute teneur (12 0/0), c'est au creuset que l'on donne la préférence. L'acier à 12 0/0 de manganèse convient pour les pièces moulées et l'acier à 5 0/0 pour les mâchoires de broyeurs.

Aciers au chrome. — Ils s'obtiennent le plus souvent au creuset. Ils reviennent un peu plus cher que les aciers au nickel.

Un acier à 2 0/0 de chrome et à 0,8 0/0 de carbone convient à la fabrication d'obus de rupture. A une teneur plus élevée, on s'en sert pour les aciers à outils qui possèdent alors une dureté remarquable (outils de tours, outils à travailler les projectiles trempés et les bandages en acier dur, outils à forer, à raboter, etc.). Dans d'autres cas, cet acier trouve son emploi dans la confection de fraises, tarauds, filières, lames d'alésage, cylindres de laminoirs, bandages de freins.

On forge ces aciers au rouge cerise et on les trempe à la température du rouge cerise naissant dans l'eau ordinaire, dans l'eau de chaux à 15° C. ou dans l'huile. La dureté acquise par ces produits paraît due au chrome lui-même, qui est dur au point de rayer le verre.

L'acier chromé industriel contient ordinairement un autre métal, tel que le nickel ou le tungstène.

Voici un exemple de la résistance à la traction offerte par un acier au nickel-chrome des aciéries Schneider et C^ie^ (barreaux de 13,8 $\times$ 100) :

TRAITEMENT	E par mm²	R par mm²	A 0/0
Acier à 60 kilogrammes (mi-dur)			
Recuit à 900°.....	45	65	18
Trempé et recuit.....	65	77	14
Acier à 70 kilogrammes (dur)			
Recuit à 900°.....	54	75	14
Trempé et recuit.....	80	92	10

Aciers au tungstène. — On les obtient au creuset à température élevée. Ils donnent notamment d'excellents outils à grande vitesse, tours, mortaiseuses, raboteuses, fraiseuses, ainsi que des ressorts de bonne qualité. A l'état trempé, on s'en sert pour faire des outils à tourner les métaux durs, des lames d'alésage de canons, des mèches américaines, des fraises pour métaux durs.

On forge ces produits au rouge cerise et on les trempe au rouge cerise sombre.

L'acier au tungstène rentre dans la catégorie des aciers auto-trempants. Il est tellement dur qu'il ne peut être travaillé ni au tour ni à la lime. Pour le façonner, il faut le forger, puis le meuler. La chaleur diminue très peu sa dureté, ce qui est précieux pour les outils à grande vitesse de coupe. Cet acier retient une grande quantité de magnétisme rémanent; ce phénomène, maximum pour une teneur de 7,5 0/0 de tungstène, montre que ce produit convient pour la fabrication des aimants permanents.

Aciers au molybdène. — Ces aciers offrent beaucoup d'analogie avec les aciers au tungstène, mais ils coûtent plus cher, ce qui est un obstacle à leur développement. On les utilise cependant comme outils à grande vitesse, arbres de couche de grande dimension, manivelles pour navires. L'addition de molybdène fournit des outils pouvant travailler des pièces d'acier très dur telles que l'acier chromé.

Aciers au silicium. — Ces produits possèdent une grande résistance au choc. Ils ont en même temps une limite élastique élevée. On les obtient au four Martin sur sole acide. Leur teneur en silicium est assez peu élevée. Ils servent à la confection des ressorts.

Aciers au vanadium. — Les aciers à faible teneur en vanadium sont des alliages très durs dont la charge de rupture et la limite élastique sont élevées.

Des expériences et des études auxquelles il s'est livré, M. L. Guillet en a tiré les conclusions suivantes :

1° Tant que le vanadium est en solution dans le fer, la charge de rupture et la limite élastique augmentent, les allongements et les strictions décroissent lentement, la fragilité et la dureté augmentent un peu avec le pourcentage de vanadium.

2° Lorsque le vanadium est à l'état de carbure, et tant qu'il reste encore de la perlite, la charge de rupture, la limite élastique décroissent, la fragilité et la dureté paraissent diminuer avec le pourcentage en vanadium.

3° Quand tout le carbone est à l'état de carbure, on a des propriétés qui ne varient guère avec la composition de l'acier : celui-ci possède une charge de rupture et une limite élastique plutôt faibles, d'assez beaux allongements ; cependant il est très fragile.

Aciers spéciaux divers. — Des essais ont été faits sur des aciers ternaires comme les aciers au titane, à l'aluminium, au cobalt, à l'étain, au bore, au cuivre. Ces produits ne semblent pas susceptibles, pour le moment, d'applications industrielles.

Par contre, certains aciers quaternaires tels que les aciers nickel-chrome, chrome-tungstène, manganèse-silicium s'emploient dans l'industrie.

Les propriétés magnétiques d'aciers de diverses compositions ont été étudiées par M^me^ Sklodowska-Curie.

Les déterminations ci-après résultent d'expériences faites par cet auteur sur des barreaux de 20 centimètres de longueur et de 1 centimètre de côté.

NATURE ET ORIGINE DES BARREAUX	MÉTAL SPÉCIAL en 0/0	CARBONE en pour 100	TEMPÉRATURE DE TREMPE en degrés C.	CHAMP COERCITIF H	INTENSITÉ D'AIMANTATION rémanente Ir	INDUCTION RÉMANENTE Br
Aciers au nickel	Nickel					
Fourchambault Ni_1	3,6	0,57	730	55	»	»
— Ni_2	3,0	0,70	730	48	»	»
— Ni_3	3,7	1,21	730	48	»	»
Aciers au manganèse	Manganèse					
Fourchambault A	0,7	0,46	780	32	»	»
— B	1,8	1,18	780	61	»	»
— C	2,2	1,94	780	155	»	»
Hadfield. Recuit	13	1,0 ?	»	35	»	»
— Trempé	13	1,0 ?	800	?	»	»
Aciers au chrome	Chrome					
Assailly C_1	2,5	0,50	900	45	460	5.770
— C_2	2,8	0,82	900	56	500	6.250
— C_3	3,4	1,07	850	57	530	6.750
Aciers au tungstène	Tungstène					
Assailly V_1	2,9	0,55	850	51	460	5.750
— V_2	2,7	0,76	850	66	510	6.375
— V_3	2,7	1,10	830	68	500	6.250
Châtillon et Commentry *a*	3,2	0,77	»	65	550	6.875
— — *b*	2,7	1,02	800	69	540	6.750
— — *c*	3,5	1,53	1.000	50	320	4.000
Boehler (Styrie) spécial très dur	2,9	1,10	850	74	530	6.250
— Boréas non trempé	7,7	1,96	»	45	350	4.375
— — trempé	7,7	1,96	800	85	370	4.625
Aciers au molybdène	Molybdène					
Châtillon et Commentry A	3,5	0,51	850	60	530	750
— — B	3,4	1,25	800	82	480	6.000
— — —	4,0	1,24	800	85	530	6.750
— — C	3,9	1,72	770	73	510	6.375
— — —	»	1,72	800	78	560	7.000
Aciers au silicium	Silicium					
Châtillon et Commentry I	0,11	0,91	780	54	»	»
— — II	0,64	0,91	780	50	»	»
— — III	1,28	0,72	780	34	»	»

ANALYSE CHIMIQUE

Les éléments qui constituent les aciers au carbone (carbone combiné, manganèse, phosphore, soufre, silicium) se retrouvent dans la composition des aciers spéciaux. Leur dosage s'effectue d'ailleurs de la même façon.

Quant au métal spécial incorporé, on le dose séparément. On peut employer à cet effet les méthodes suivantes qui s'appliquent aux cas particuliers précédents et qui conduisent à de bons résultats.

Nickel. — Si la proportion de nickel est notable, on se sert du procédé suivant employé au Creusot :

On attaque l'alliage par l'eau régale, on fait bouillir la dissolution, ce qui détermine la peroxydation du fer. On ajoute du chlorure d'ammonium, puis de l'ammoniaque. L'oxyde ferrique seul est précipité, le chlorure d'ammonium empêchant la précipitation de l'oxyde de nickel. Après filtration, on traite la liqueur par le sulfure d'ammonium ; on la rend légèrement acide au moyen de l'acide chlorhydrique. Il y a précipitation du sulfure de nickel que l'on dessèche, que l'on calcine et que l'on pèse à l'état d'oxyde de nickel vert. Pour plus de précision, on redissout ce précipité dans l'eau régale et on précipite à nouveau l'oxyde de nickel par la potasse. On filtre, on calcine et on pèse.

Une autre méthode recommandée par M. Arnold consiste à séparer les métaux par des précipitations successives au moyen de l'hydrogène sulfuré et des acétates, puis à oxyder le nickel par le brome en liqueur sodique et enfin à séparer l'oxyde de nickel que l'on calcine et que l'on pèse.

Chrome. — On désagrège l'acier à l'aide de la potasse ou du bisulfate de potassium, on sépare la silice de l'oxyde ferrique, puis on transforme le chromate alcalin en chromate de plomb ou en chromate mercureux par l'addition de nitrate de plomb ou de nitrate mercureux. On calcine le précipité et on pèse le chromate de plomb ou l'oxyde de chrome.

Tungstène. — L'alliage est dissous dans l'eau régale. On évapore à sec, on reprend par l'acide chlorhydrique, on filtre. Le résidu se compose d'acide tungstique, de silice, de graphite et de quelques parties non attaquées. Une calcination le débarrasse du graphite. On fond le résidu avec du bisulfate de potassium. On reprend par l'eau pour enlever les sels de fer et de potassium solubles. On traite le résidu par le sulfure d'ammonium qui dissout le tungstène. On évapore à sec la solution. On calcine légèrement ce nouveau résidu et on obtient ainsi l'acide tungstique WO^3.

Molybdène. — On dissout l'acier par l'acide chlorhydrique. On sépare la silice insoluble par une évaporation à sec suivie d'une reprise par l'eau acidulée et d'une filtration. On précipite le molybdène à l'état de sulfure par un courant d'hydrogène sulfuré. On effectue ensuite une série d'opérations qui ont pour but de purifier le précipité que l'on pèse finalement à l'état de sulfure de molybdène.

Vanadium. — La méthode de dosage recommandée par M. Em. Campagne repose sur l'ensemble des propositions suivantes :

1° L'éther chargé d'acide chlorhydrique dissout le chlorure ferrique et ne dissout pas les oxychlorures du vanadium ;

2° L'oxychlorure $VOCl^3$ est réduit en $VOCl^2$ par l'ébullition prolongée avec l'acide chlorhydrique, tandis que le chlorure ferrique n'est pas altéré ;

3° Par la transformation des chlorures en sulfates, on obtient du sulfate de divanadyle bleu $V^2O^2(SO^4)^2$ et du sulfate ferrique.

Au moyen d'une liqueur titrée de permanganate, on peut déterminer la quantité d'oxygène nécessaire pour transformer le sulfate de divanadyle en sulfate vanadique $V^2O^2(SO^4)$, et par suite la quantité de vanadium contenue dans la liqueur.

Un autre procédé, indiqué par Blair, consiste à transformer le vanadium en vanadate mercureux, puis en vanadate d'ammonium, et, après séparation des matières étrangères, à peser l'acide vanadique obtenu.

COMPOSITION CHIMIQUE						ACIERS BRUTS DE FORGE — ESSAIS — à la traction						ACIERS TREMPÉS — ESSAIS — à la traction					
						R	E	A 0/0	Σ	au choc (méthode Frémont) kg. m.	à la dureté (méthode Brinnell)	R	E	A 0/0	Σ	au choc (méthode Frémont) kg. m.	à la dureté (méthode Brinnell)
Aciers au nickel																	
C	Ni																
0,120	2	»	»	»	»	35,9	29,5	23,0	73,0	35,5	122	50	30,7	20	73,3	28	125
0,120	15	»	»	»	»	97,9	86,0	0,5	0	0	242	105,9	87,0	5,5	46,5	4	250
0,120	30	»	»	»	»	45,0	29,5	29,5	63,9	12,5	113	42,2	20,8	21	17,8	5	113
0,800	2	»	»	»	»	89,0	45,5	15,7	24,1	3	234	»	»	»	»	2	567
0,800	15	»	»	»	»	45,5	33,8	4,0	5	7	148	45,5	33,8	4	5	8	134
0,800	30	»	»	»	»	79,7	48,1	32,5	50,0	40	174	73,5	36,2	25	24,8	30	153
Aciers au manganèse																	
C	Mn	Si	S	P													
0,082	0,432	0,163	0,012	0,015	»	37,6	27,8	22,0	76,5	38	87	44,4	26,3	17	74,2	39	105
0,276	5,600	1,100	traces	0,015	»	71,9	71,9	0,2	2,9	3	418	67,5	67,5	10	73,4	2	418
0,396	33,480	1,505	0,005	0,018	»	61,4	34,2	45,0	74,6	28	134	63,3	33,9	47	73,5	33	134
0,873	0,461	1,351	0,024	0,020	»	114,9	59,5	6,0	9,0	3	217	»	»	»	»	0	532
0,762	5,112	1,111	0,011	0,013	»	86,6	60,2	2,0	3,0	0	418	54,3	42,7	1	0	4	248
0,960	12,096	0,876	0,013	0,011	»	89,6	61,8	15,0	14,7	23	202	79,1	41,4	13	13,5	32	196
Aciers au chrome																	
C	Cr	Si	S	P	Mn												
0,043	0,703	0,971	traces	0,015	0,000	35,4	22,6	25,0	74,9	32	95	»	»	»	»	»	»
0,154	10,136	0,200	0,028	0,006	»	139,3	101,7	1,0	0	9	387	»	»	»	»	»	»
0,464	31,746	0,373	0,006	0,024	traces	57,5	43,3	12,0	50,4	1	156	»	»	»	»	»	»
0,865	0,519	0,243	0,017	0,015	0,027	109,2	79,1	3,5	16,6	3	310	»	»	»	»	»	»
0,751	9,376	0,885	0,005	0,024	traces	94,1	79,1	13,0	0	3	387	»	»	»	»	»	»
0,828	36,340	0,326	0,014	0,026	»	»	»	»	»	2	228	»	»	»	»	»	»

Aciers au tungstène

C	W	Mn	Si	S	P												
0,117	0,412	traces	0,035	traces	0,013	41,1	30,1	19,0	66,5	25	97	»	»	»	»	»	»
0,173	11,890	0,067	0,046	0,013	0,008	86,6	79,1	5,0	47,7	6	223	»	»	»	»	»	»
0,276	27,750	»	0,139	0,012	0,016	67,0	56,4	2,5	0	6	217	»	»	»	»	»	»
0,861	0,397	0,027	0,040	0,023	0,012	103,2	56,4	6,0	17,6	1	241	»	»	»	»	»	»
0,815	9,991	»	0,093	0,014	0,015	134,8	101,7	2,5	3,0	5	302	»	»	»	»	»	»
0,867	39,967	»	0,280	0,017	0,006	113,0	94,1	0,5	0	6	351	»	»	»	»	»	»

Aciers au molybdène

C	Mo	Si	S	P	Mn												
0,188	0,450	0,117	0,009	0,018	0,070	48,9	37,6	18,5	69,3	24	131	84,3	48,3	2	12,7	5	207
0,138	2,290	0,128	0,009	0,021	0,168	82,8	67,7	7,5	12,1	15	212	82,8	82,8	6	11,5	7	228
0,289	4,500	0,117	0,039	0,026	0,500	130,6	103,2	6,0	7,5	3	387	122,0	84,3	2	12,7	5	444
0,735	0,504	0,210	0,032	0,021	0,260	115,2	82,8	7,0	7,5	1	286	»	»	»	»	0	512
0,824	5,750	0,304	0,023	0,020	0,380	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,692	14,640	0,373	0,090	0,032	0,230	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

Aciers au silicium

C	Si	S	P	Mn													
0,208	0,709	0,061	0,117	0,717	»	60,2	45,2	17,0	57,2	6	153	83,8	50,9	9	28,5	6	223
0,216	7,170	0,030	0,025	0,450	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,277	25,500	0,008	0,015	0,674	»	61,7	52,6	0	0	0	248	62,7	52,7	0	0	3	311
0,878	0,433	0,013	0,057	0,730	»	115,2	62,5	5,5	10,4	2	302	121,9	97,7	13	8,0	5	555
0,808	7,310	0,025	0,020	0,505	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,431	26,800	»	»	0,758	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

Aciers au vanadium

C	Va	Mn	Si	S	P												
0,114	0,290	6,125	0,105	0,031	0,031	43,8	30,2	24,0	62,5	30	140	54,6	49,2	22,5	66,5	10	156
0,130	1,540	0,380	0,248	0,048	0,015	56,4	44,8	19,0	72,5	30	159	1,7	52,1	14	67,1	18	156
0,120	10,275	traces	0,539	0,160	0,016	46,5	25,3	21,0	53,1	4	118	46,9	26,2	22	55,8	2	124
0,816	0,250	0,445	0,326	0,037	0,031	88,5	43,8	8,0	20,3	3	286	115,3	103,0	6	12,0	0	600
0,618	1,580	0,340	0,292	0,021	0 053	94,9	64,1	9,0	31,3	3	262	112,2	101,1	13	13,0	3	321
0,858	10,250	0,562	0,993	0,048	0,079	62,5	31,6	12,0	37,5	0	179	58,2	42,3	17,5	33,2	0	187

ESSAIS

Les essais que l'on effectue sur les aciers spéciaux sont absolument identiques à ceux que l'on fait sur les aciers au carbone. Les machines et les méthodes employées sont les mêmes. Il n'y a donc pas lieu d'y insister.

M. Léon Guillet s'est consacré à l'étude des aciers spéciaux. Des travaux qu'a publiés cet ingénieur, on a extrait les résultats qui ont été réunis dans le tableau des pages 500-501. Les aciers étudiés appartenaient à deux catégories : la première catégorie comprenait des aciers peu carburés, la seconde des aciers très carburés.

Dans ce qui précède, on n'a parlé que des aciers spéciaux industriels les plus importants. On fabrique cependant d'autres aciers, tels que les aciers au titane, au cobalt, à l'étain, au cuivre, à l'aluminium, au bore, etc. ; mais, pour le moment du moins, ces alliages ne paraissent pas devoir se répandre, parce qu'ils sont d'un prix de vente trop élevé, eu égard aux avantages que présentent quelques-uns d'entre eux. Parmi les usines françaises qui s'occupent de la fabrication des aciers spéciaux, on citera la Compagnie de Châtillon-Commentry et Neuves-Maisons, les aciéries et forges de Firminy, les aciéries d'Imphy, Schneider et C^ie^, J. Holtzer, les forges et aciéries de la Marine, etc.

CHAPITRE XXV

CUIVRE. — ALLIAGES DE CUIVRE

Le cuivre, le bronze et le laiton constituent après le fer et ses dérivés les produits métalliques dont l'emploi est le plus fréquent dans l'industrie et dans les travaux publics.

I. — CUIVRE

Propriétés physiques. — Le cuivre est un métal rouge brun qui acquiert un brillant éclat par le polissage. Il est très malléable ; il se réduit facilement en feuilles minces ou en fils excessivement fins. Sa densité à l'état fondu varie de 8,8 à 8,9 ; elle s'élève à 8,95 par le laminage en donnant un métal écroui, dur et élastique. Sa dureté est plus grande que celle de l'or et de l'argent.

Il fond vers 1.054° et se vaporise à une température encore plus élevée en donnant naissance à des vapeurs vertes. L'intensité de la coloration pourrait laisser supposer que le métal est très volatil; il n'en est rien cependant puisque, chauffé plusieurs jours dans un four porté à une assez haute température, il ne perd que 0,5 0/0 de son poids. Refroidi lentement, le cuivre fondu cristallise dans le système cubique.

Il est très bon conducteur de la chaleur; aussi s'en sert-on dans la confection des alambics, des ustensiles de cuisine, des chaudières d'évaporation de sucreries, des réfrigérants des brasseries, etc. Il est aussi bon conducteur de l'électricité ; cette propriété est fréquemment utilisée.

Le cuivre est doué d'une odeur et d'une saveur faibles et

désagréables. Chauffé à 100°, il possède une dilatation linéaire qui est $\frac{1}{582}$ de sa longueur à la température de 0°.

Son coefficient de dilatation linéaire entre 0 et 100° C. est de 0,000016780 par degré.

Un essai de traction démontre qu'une éprouvette de cuivre ne se rompt que sous un effort moyen de 34 kilogrammes par millimètre carré de section. Inférieur au fer sous ce rapport, il lui est supérieur au point de vue de l'élasticité. L'allongement élastique peut aller avant la rupture jusqu'à 36 et 48 0/0.

La résistivité à 0° C. du cuivre recuit est de 1,584 ohm-cm; celle du cuivre écroui est de 1,619 ohm-cm. La résistance électrique à 0° C. d'un fil de 1 mètre de longueur, pesant 1 gramme, est de 0,1421 ohm pour le cuivre recuit, tandis qu'elle est de 0,1449 ohm pour le cuivre écroui.

Propriétés chimiques. — Le cuivre ne s'altère pas à l'air sec, mais en présence de l'humidité il se recouvre d'une couche d'hydrocarbonate de cuivre désignée communément sous le nom de vert-de-gris. Cette couche, qui constitue aussi la *patine*, se forme sur les bronzes, vis-à-vis desquels elle joue le rôle d'enduit protecteur qui les met à l'abri de toute altération ultérieure.

Chauffé jusqu'au rouge, le cuivre se revêt d'oxyde cuivreux de teinte rouge violacé faisant place ensuite à de l'oxyde cuivrique anhydre noir. Le cuivre fondu s'imprègne de cette matière et perd alors sa ductilité; son grain devient rouge terne. Ses qualités primitives ne lui sont rendues que par une nouvelle fusion au contact du charbon.

Le soufre, le phosphore et l'arsenic se combinent directement avec le cuivre, sous l'influence de la chaleur. Une assez faible quantité de phosphore suffit à faire acquérir au métal une grande dureté. Le cuivre fondu absorbe du charbon au bout de quelque temps et devient aigre.

Usages. — Conditions de recette. — Le cuivre pur est habituellement employé sous forme de tôles, de barres pleines ou de tuyaux. Les tôles servent à la fabrication des parois de

chaudières et de foyers intérieurs pour les locomotives de chemins de fer, de feuilles de revêtement pour la marine. Les barres pleines trouvent leur emploi dans les entretoises de foyers de locomotives. Quant aux tuyaux, leur usage est indiqué dans la confection de conduites de vapeur de fluides ou de liquides quelconques.

Quelle que soit la forme sous laquelle il se présente, le cuivre, quand il est éprouvé, est soumis à des essais de traction, d'emboutissage, de flexion et de pliage à froid. Ces essais ont été décrits d'autre part.

II. — ALLIAGES DE CUIVRE

Propriétés physiques. — Les alliages de cuivre, de même que les autres alliages, sont de véritables métaux possédant des propriétés différentes de celles des éléments qui les composent. L'examen microscopique caractérise leur constitution physique et met en évidence les combinaisons cristallines des corps dont ils sont formés.

Il convient de remarquer que la formule $D = \frac{(p+p')\,dd'}{pd' + p'd}$ qui donne la densité d'un mélange de plusieurs corps en proportions connues n'est pas applicable dans le cas des alliages de cuivre. La détermination de la densité doit être faite expérimentalement. Ainsi les bronzes et les laitons de certaines compositions possèdent les densités suivantes :

		Densités
Bronzes	90 Cu + 10 Sn	8,78
	85 Cu + 15 Sn	8,89
	80 Cu + 20 Sn	8,74
	75 Cu + 25 Sn	8,83
Laitons jaunes	70 Cu + 30 Zn fondu	8,44
	70 Cu + 30 Zn laminé	8,56
	70 Cu + 30 Zn étiré	8,70
Laiton rouge	90 Cu + 10 Zn	8,60
Laiton blanc	50 Cu + 50 Zn	8,20

1. Les lettres p, p', d, d', désignent les poids et densités respectifs des éléments constitutifs du composé.

La trempe et le martelage à froid ont pour effet d'augmenter la densité des bronzes. La trempe rend, en outre, ces alliages élastiques et sonores ; c'est sur cette propriété qu'est fondée la fabrication du métal des cloches et des tam-tams.

Les alliages de cuivre ont un degré de fusibilité moins élevé que le moins fusible des métaux qui les constituent. Leur dureté est généralement augmentée ; leur ténacité, leur ductilité et leur malléabilité sont au contraire diminuées.

Lorsque la température est supérieure à 250°-300°, le laiton a une résistance et un allongement de beaucoup inférieurs à ceux qu'il présente à des températures inférieures. A 250°, la valeur de R est inférieure de 15 0/0 à celle que l'on constate à la température ordinaire pour le même barreau.

Les bronzes ordinaires ont à 190° des résistances et des allongements notablement inférieurs. Les bronzes phosphoreux présentent, sous ce rapport, des avantages sur les bronzes ordinaires, tandis que le contraire se produit avec les bronzes d'aluminium, sauf lorsqu'ils se trouvent à l'état laminé.

Pour le laiton en planches, on exige des surfaces très nettes ; il faut s'attacher dans les laminages à froid à débarrasser le laiton des pailles et tous défauts que révèle un examen attentif.

Dans les laitons *de guerre*, on attache une grande importance aux essais physiques et mécaniques. L'essai de traction, entre autres, est considéré comme une épreuve indispensable dans la réception des laitons destinés à la fabrication des douilles et étuis de cartouches, et la confection des barreaux d'essai est entourée de soins tout particuliers.

Dans la pratique courante, on emprunte, comme il est dit d'autre part, les procédés en usage pour la réception des matériaux ferreux. Les essais d'emboutissage et les épreuves hydrauliques sont utilisés lorsqu'il s'agit de feuilles de laiton destinées à la fabrication des tubes.

On comprend aussi que la brasure et la soudure tendre nécessitent l'emploi d'un métal doux.

Le tableau suivant donne quelques comparaisons entre les résistances offertes par le cuivre, le laiton et le bronze :

CUIVRE ET ALLIAGES	CHARGE PRATIQUE			CHARGE LIMITE D'ÉLASTICITÉ			CHARGE DE RUPTURE		COEFFICIENTS D'ÉLASTICITÉ en kg. par mm²		ALLONGEMENT PROPORTIONNEL à la limite d'élasticité Traction
	traction	compression	cisaillement	traction	compression	cisaillement	traction	compression	traction et compression	cisaillement	
Cuivre laminé écroui	6,6	6,6	5,0	14,0	14,0	10,5	»	»	10.700	4.012,0	0,0013
Cuivre laminé recuit	2,5	2,0	1,5	3,0	2,75	2,0	21,0	41,0	10.700	4.012,0	0,00027
Fil de cuivre	6,6	»	»	12,0	»	»	42,0	»	12.000	»	0,001
Laiton	2,5	»	1,9	4,85	»	3,64	12,4	7,3	6.400	2.400,0	0,00076
Fil de laiton	6,6	»	5,0	13,3	»	»	36,5	»	9.870	»	0,00135
Bronze 8Cu + 1Sn	2 »	»	1,5	3,0	»	3,25	25,6	»	6.000	2.380,0	0,00063

Les coefficients de dilatation linéaire par degré pour les températures comprises entre 0° et 100° C. sont les suivants :

Cuivre	0,000016780
Laiton	0,000018782
Bronze (3Cu + 1Sn)	0,000018440

Propriétés chimiques. — Le cuivre forme la base du plus grand nombre des alliages usuels.

L'examen microscopique des alliages de cuivre vient compléter, d'une façon très heureuse, les renseignements que l'on possède sur les propriétés chimiques de ces corps. Il fait connaître si les alliages ont été réduits et il permet même, d'après M. Guillemin, de savoir quelle est la nature du réducteur.

Les travaux de MM. Riche et Berthelot ont montré que la composition du noyau central des alliages n'est pas la même que celle des autres parties.

Par le procédé métallographique, on se rend compte si un bronze a été coulé trop chaud ou trop froid, s'il a été refroidi lentement ou brusquement. S'il s'agit d'un bronze phosphoreux, on sait que, s'il a été coulé trop chaud, il roche au moment de sa solidification. On voit sortir des têtes de jets et de parties à jour des masselottes, des filaments vermiculaires liquides qui s'amassent en forme de champignons. La composition de ces filaments est bien différente de celle de la pièce coulée. L'étain et le phosphore s'y trouvent en proportion beaucoup plus considérable que dans le corps de la pièce (G. Guillemin).

Le laminage à froid de métaux possédant une grande malléabilité, mais ne s'écrouissant pas facilement, présente des aspects micrographiques analogues à ceux produits par le laminage à chaud. Il n'en est pas de même pour les alliages dont l'écrouissage est facile, pour lesquels le laminage, le martelage et l'étirage à froid fournissent des états moléculaires différents que l'on observe aisément au microscope.

Le tableau suivant donne la composition de quelques alliages de cuivre d'un emploi courant dans l'industrie :

DÉSIGNATION DES ALLIAGES	PROPORTIONS RESPECTIVES DE CUIVRE	ÉTAIN	ZINC	PLOMB	FER	USAGES
Bronze	90,10	9,90	»	»	»	Anciens canons.
Bronze zincifère	73,60	9,50	9,09	7 »	0,42	Coussinets de machines.
Alliage très dur	6,10	11,32	62,64	19,94	»	Locomotives.
Alliage de Calvert et Johnson	6,80	12,58	69,56	11,06	»	id.
Métal de Muntz	66 »	»	34 »	»	»	Doublage des navires.
Alliages dits « bronzes de couleur » — cuivre	99,90	»	»	»	0,08	Pour la peinture.
Alliages dits « bronzes de couleur » — jaune orangé	98,93	»	0,73	»	0,20	id.
Alliages dits « bronzes de couleur » — jaune rouge	90 »	»	9,60	»	0,07	id.
Alliages dits « bronzes de couleur » — jaune foncé	84,50	»	15,30	»	0,16	id.
Alliages dits « bronzes de couleur » — verte	84,32	»	15,02	»	0,30	id.
Laitons de — Romilly	70 »	»	30 »	»	»	Pour les travaux au marteau.
Laitons de — Stolberg	65,80	0,20	31,80	»	2,20	Pour les chaudières.
Laitons de — anglais	70,29	0,17	29,26	»	0,28	Pour les travaux au marteau.
Laitons de — Jemmapes	64,60	0,20	33,70	»	1,50	Utilisé par les tourneurs.
Soudure forte jaune	53,30	1,30	43,10	»	0,30	Alliage peu fusible.
Soudure blanche	57,40	14,60	28 »	»	»	Alliage très fusible.
			ANTIMOINE	ALUMINIUM		
Alliage pour coussinets	9 »	73 »	18 »	»	»	Pour roues et hélices.
Métal antifriction	32 »	36 »	32 »	»	»	»
Bronze d'aluminium	90 »	»	»	10 »	»	»

La présence de matières étrangères, même en faible quantité, a pour résultat de modifier d'une façon très sensible les propriétés des alliages; il y a, par ce fait, une grande analogie avec ce qui se produit dans les aciers.

Les bronzes phosphoreux contenant de 0,17 à 0,76 de phosphore offrent une très grande résistance; on les obtient par l'incorporation au bronze ordinaire de phosphore de cuivre ou d'étain. Une teneur trop élevée en phosphore offrirait toutefois l'inconvénient de donner un alliage cassant.

Le laiton d'aluminium (63 Cu + 33,67 Zn + 3,33 Al) possède une plus grande ténacité et une plus grande dureté que le laiton ordinaire.

On admet généralement que 0,01 0/0 d'arsenic rend le cuivre impropre à la fabrication des câbles électriques en raison de la diminution de la conductibilité.

0,10 0/0 de bismuth donne des alliages monétaires sujets à l'écrasement sous l'effet du balancier.

Une proportion de 0,01 0/0 de bismuth, d'arsenic ou d'antimoine modifie les propriétés mécaniques du cuivre.

L'addition de fer diminue la dureté de l'alliage sans changer la résistance; il en est de même si l'on ajoute du manganèse.

Le zinc augmente l'élasticité, mais rend l'alliage plus fluide.

A dose inférieure à 1 0/0, le plomb n'a pas d'inconvénient.

Une teneur de 0,50 0/0 d'antimoine donne, au contraire, de mauvais résultats.

Une quantité de cobalt ou de nickel inférieure à 0,1 0/0 suffit à dénaturer les propriétés mécaniques du cuivre.

Quant au soufre, il rend l'alliage cassant à froid.

Conditions de recette. — 1° *Bronzes.* — Les bronzes ordinaires employés dans l'industrie en vue de la confection de pièces destinées à supporter des frottements : coussinets, garnitures, tiroirs de distribution de vapeur, etc., ont des compositions un peu différentes.

Pour les pièces sans frottement, on limite quelquefois à 8 0/0 la proportion d'étain, tandis que pour les pièces à frottement alternatif on tolère 14 0/0. Dans les pièces à frotte-

ment circulaire, on admet même une teneur en étain de 16 0/0.

Dans les garnitures métalliques de tiges à piston, on remplace le cuivre par le plomb et l'antimoine dans une proportion de 14 0/0.

L'administration des chemins de fer de l'État et la Compagnie des chemins de fer Paris-Lyon-Méditerranée exigent dans leurs marchés et fournitures des alliages ayant les compositions suivantes :

DÉSIGNATION DES ALLIAGES	COMPOSITION CENTÉSIMALE			
	CUIVRE	ÉTAIN	ZINC	NICKEL
Bronzes :				
Pièces à frottement circulaire :				
Coussinets de boîte à graisse, de bielles motrices, d'accouplement, colliers d'excentriques	82 »	16 »	2 »	»
Pièces à frottement alternatif :				
Tiroirs, bagues de presse-étoupes, soupapes de sûreté et leurs tiges, pièces filetées, vis, écrous	84 »	14 »	2 »	»
Pièces non sujettes à frottement continu :				
Robinets, sifflets, godets graisseurs, pièces des injecteurs, écrous divers	90 »	8 »	2 »	»
Bronze rouge :				
Pour pièces destinées à être brasées sur les tuyaux	95 »	3 »	2 »	»
Bronze blanc de nickel	58 »	»	18 »	24 »
Laitons	70 »	»	30 »	»
	67 »	»	33 »	»
	65 »	»	35 »	»
	63 »	»	37 »	»

Les bronzes ne sont généralement pas soumis à des essais mécaniques. Cependant la Marine exige pour ses hélices des essais de traction.

Les bronzes phosphoreux, siliciés ou manganésés supportent des essais de traction remarquables. Les corps ajoutés sont rarement supérieurs à 1 0/0 dans le produit fini.

Certains bronzes phosphoreux peuvent donner à l'état non recuit des résistances de 70 à 110 kilogrammes après écrouissage et de 35 à 40 kilogrammes à l'état recuit avec un allongement de 37 à 46 0/0.

Le métal *roma* (bronze manganésé) offre une résistance de 31 à 35 kilogrammes avec un allongement de 20 0/0.

Le métal *delta* est un laiton ferreux à 55 0/0 de cuivre, 42 0/0 de zinc et des traces de métaux divers, plomb, fer, manganèse, nickel. L'essai de traction donne 33 à 38 kilogrammes avec allongement de 24 à 28 0/0.

2° *Laitons.* — L'analyse chimique est le principal moyen de contrôle des laitons. Pour les tubes à fumée des chaudières de locomotives, on exige 70 0/0 de cuivre; pour d'autres objets de fabrication courante, une proportion de 63 0/0 est suffisante.

La tolérance de matières étrangères peut varier de 0,5 à 2 0/0. Le plomb peut quelquefois remplacer le zinc jusqu'à concurrence de 2 0/0.

Les laitons sont assez rarement soumis à des essais mécaniques.

ANALYSE CHIMIQUE

D'après ce qui précède, on voit que la composition chimique joue un rôle très important dans les conditions de qualité auxquelles doit satisfaire un alliage destiné à un emploi déterminé.

Les bronzes et les laitons sont essentiellement composés, comme on le sait, de cuivre et d'étain ou de cuivre et de zinc. Mais ils renferment souvent aussi comme impuretés du plomb, du fer, de l'antimoine, ou encore de l'arsenic en quantité plus ou moins grande. Un essai qualitatif permet de reconnaître presque immédiatement la nature de ces impuretés.

Essai qualitatif. — Dans le but de déterminer les matières étrangères contenues dans un alliage de cuivre, on réduit d'abord celui-ci en copeaux ou en limaille que l'on attaque

par l'acide azotique étendu. S'il y a un résidu, on le sépare par filtration. Dans la liqueur filtrée, on recherche le plomb à l'aide de l'acide sulfurique, et, après élimination du plomb et du cuivre par l'hydrogène sulfuré, on constate la présence du zinc par le sulfure d'ammonium. Un essai au chalumeau caractérise l'étain qui se trouve dans le résidu insoluble. L'appareil de Marsh permet de reconnaître s'il y a de l'arsenic et de l'antimoine.

Ces opérations préliminaires une fois faites, on procède à l'analyse quantitative.

Analyse quantitative. — *Étain.* — On attaque 2 grammes d'alliage réduit en limaille par 20 centimètres cubes d'acide azotique de densité 1,30 bien exempt d'acide chlorhydrique. On chauffe légèrement jusqu'à cessation d'effervescence et disparition complète des vapeurs nitreuses. On évapore presque à siccité dans une capsule de porcelaine. Le résidu est formé d'acide métastannique.

S'il existe des éléments volatils, tels que l'arsenic, l'antimoine, ils se trouvent mélangés avec les oxydes insolubles. Il convient dans ce cas d'en faire le dosage et de les déduire du chiffre trouvé.

Le résidu est ensuite repris par l'eau. On filtre. On lave le précipité, on le dessèche, on le calcine et on le pèse sous forme d'acide métastannique

$$Sn = 0{,}787 \times Sn^5O^{10}.$$

Plomb. — La liqueur filtrée provenant de l'opération précédente est additionnée d'un peu d'acide sulfurique qui transforme tous les métaux, sauf le plomb, en sulfates solubles. On concentre la liqueur jusqu'à production de fumées blanches abondantes, puis on recueille le sulfate de plomb insoluble sur un filtre. On lave le précipité et on le filtre d'abord avec de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, puis avec de l'alcool. On dessèche, on calcine et on pèse le résidu de sulfate de plomb.

$$Pb = 0{,}683 \times PbSO^4.$$

Cuivre. — Le liquide précédent, qui ne doit pas excéder un volume de 100 centimètres cubes, est versé dans une capsule de platine tarée ; il est soumis à l'électrolyse. On se sert à cet effet de l'appareil représenté par la figure 167. Cet appareil se compose d'une tige de verre garnie d'un support en cuivre sur lequel repose la capsule en platine formant cathode. L'anode est constituée par un disque en platine percé de trous dans l'axe duquel une tige de même métal est fixée à un bras en cuivre relié à la tige de verre. Le disque plonge dans la solution cuivrique. Les deux électrodes communiquent avec les pôles d'une pile Bunsen. Le circuit étant fermé, le cuivre se dépose peu à peu sur la paroi intérieure de la capsule de platine, qui, si l'opération est bien conduite, se recouvre d'une couche adhérente de cuivre rouge. Il est bon, au début de l'opération, d'entretenir la température à 60° C. au moyen d'un brûleur à couronne que l'on place au-dessous de la capsule.

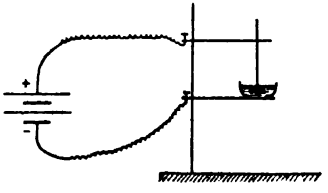

Fig. 167. — Appareil pour l'électrolyse du cuivre.

L'opération est considérée comme terminée quand une goutte de liquide ne donne plus de précipité avec une solution de ferrocyanure de potassium. On arrête alors l'expérience en enlevant la capsule et en versant immédiatement la liqueur devenue incolore dans un autre vase, puis en lavant la capsule d'abord avec de l'eau, ensuite avec de l'alcool. La capsule, après dessiccation, est pesée à nouveau ; la différence constatée donne le poids du cuivre contenu dans les 2 grammes de l'alliage.

Ce procédé de dosage rapide et exact est quelquefois remplacé par un autre qui consiste à traiter le même liquide par un courant d'hydrogène sulfuré à la température de 60°. Il se précipite ainsi du sulfure de cuivre.

Zinc. — Dans la liqueur provenant du dosage électrolytique, on ajoute par pincées successives du carbonate de

sodium jusqu'au moment où il ne se produit plus d'effervescence. Après saturation, une nouvelle addition de ce sel donne naissance à un précipité blanc de carbonate de zinc. On fait bouillir quelques instants, on filtre, on dessèche, on calcine et enfin l'on pèse l'oxyde de zinc

$$Zn = 0{,}804 \times ZnO.$$

Fer. — Si l'alliage contient du fer, ce métal est précipité à l'état d'oxyde avec le carbonate de zinc et pesé avec lui. Pour en faire le dosage, on reprend le précipité de carbonate de zinc impur pesé, on le dissout dans l'acide chlorhydrique et on précipite le fer par l'ammoniaque. On a un précipité d'oxyde ferrique Fe^2O^3 que l'on traite comme à l'ordinaire.

$$Fe = 0{,}700 \times Fe^2O^3.$$

Dans la liqueur filtrée obtenue, on peut doser directement le zinc si on ne le déduit pas par différence. Dans ce cas, on transforme le zinc d'abord en sulfure par le sulfure d'ammonium, puis après dissolution dans l'acide chlorhydrique en carbonate au moyen du carbonate de sodium.

Nickel. — S'il y avait du nickel dans l'alliage (ex. : maillechort), ce métal serait précipité à l'état de carbonate en même temps que le zinc et le fer. On séparerait d'abord le fer par l'ammoniaque, puis le zinc par les procédés ordinaires de la chimie analytique.

Phosphore. — Dans le cas où l'alliage contient du phosphore en quantité notable, il convient de le doser. Ce métalloïde se trouve dans le résidu d'acide métastannique à l'état de phosphate d'étain. On reprend le résidu calciné que l'on mélange dans un creuset avec quatre fois son poids de carbonate de sodium et autant de fleur de soufre. On chauffe le creuset incomplètement fermé à l'aide d'un brûleur. Le soufre s'enflamme et agit comme réducteur. Le sulfure de

sodium formé donne naissance à du sulfure d'étain et à du phosphate de sodium.

Après refroidissement on reprend par l'eau et par l'acide chlorhydrique étendu. Il y a dégagement d'hydrogène sulfuré et d'acide carbonique et précipitation du sulfure d'étain. On filtre. La liqueur filtrée est évaporée à sec. On reprend par l'eau, on filtre à nouveau pour éliminer la silice, s'il y en a, et dans le filtrat on précipite l'acide phosphorique par la mixture magnésienne. Le phosphate ammoniaco-magnésien obtenu est calciné; il donne du pyrophosphate de magnésium $P^2O^7Mg^2$, duquel on déduit la quantité de phosphore cherchée :

$$P = 0{,}279 \times P^2O^7Mg^2.$$

On peut aussi doser le phosphore en liqueur nitrique par le molybdate d'ammonium. On a un précipité de phosphomolybdate d'ammonium.

Arsenic, antimoine, etc. — Sauf les cas d'analyse complète ou de teneur importante, ces corps ne sont généralement pas dosés. Leur détermination se fait d'ailleurs d'après les méthodes d'analyses applicables à ces éléments.

Analyse par cémentation. — Il existe sous le nom de *cémentation* un procédé d'analyse du laiton par voie sèche. On porte à haute température un creuset en charbon de cornue contenant 1 gramme de laiton et $0^{gr},5$ d'étain pur en fragments. Ce creuset est contenu dans un récipient en terre réfractaire renfermant du charbon en poudre. On chauffe dans un fourneau à moufle, pendant six à huit heures. Il y a sublimation du zinc, qui est préservé de toute oxydation au moyen d'une couche de charbon qui entoure le creuset. On laisse ensuite refroidir le tout et on retire l'alliage de cuivre et d'étain que l'on pèse.

La différence entre ce poids et 1 gramme donne le poids du zinc volatilisé, ce qui permet aussi de connaître la teneur en cuivre.

ESSAIS

Indépendamment de l'analyse chimique, qui, pour le cuivre et ses alliages, constitue le principal moyen de contrôle, on peut soumettre ces matériaux à quelques essais mécaniques. Ces essais ont été décrits avec ceux relatifs aux métaux ferreux (chap. XXIII, *Fers, aciers, fontes*).

EXTRAIT DU CAHIER DES CHARGES GÉNÉRAL DU MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

ART. 24. — **Métaux divers.** — Les bronzes, laitons et autres alliages sont de la composition indiquée par le devis particulier. Des échantillons peuvent être analysés, et les pièces fournies sont rebutées au cas où la composition n'est pas conforme aux prescriptions.

CHAPITRE XXVI

ZINC. — BLANC DE ZINC

I. — ZINC

A la température ordinaire, le zinc est cassant. Entre 100° et 130°, il est ductile et malléable ; on peut alors le laminer en feuilles minces. Au delà de 130°, il redevient cassant. A 200°, il se laisse pulvériser facilement. A 400°, il fond ; sa densité alors a diminué. Tandis qu'elle était de 7,20 à l'état laminé, elle descend à 6,86 lorsqu'il est à l'état fondu. La distillation s'opère à 1.040°.

Le zinc présente généralement une cassure cristalline en forme de grandes lamelles. Un refroidissement lent le fait cristalliser en prismes à six pans.

Il est inaltérable à l'air sec à la température ordinaire, mais il s'altère à l'humidité. Sa surface se recouvre d'efflorescences blanches d'hydrocarbonate de zinc ; ce sel forme un revêtement protecteur assurant l'inaltérabilité du métal sous-jacent.

Les acides chlorhydrique et sulfurique dilués attaquent avec facilité le zinc commercial toujours impur. Les vapeurs acides agissent de même ; aussi doit-on éviter d'employer des toitures en zinc lorsque le dégagement de ces gaz est à craindre.

Le zinc chimiquement pur n'est pas attaqué par les acides, mais le contact d'une lame ou d'un fil de platine suffit pour provoquer un courant galvanique déterminant l'attaque rapide du zinc par les acides.

Le zinc forme avec une assez grande quantité de métaux des alliages que souvent la chaleur décompose. Les principaux sont les alliages du zinc avec le cuivre, avec l'étain, avec le cuivre et le plomb, avec le cuivre et le nickel.

Le zinc est un métal peu sonore, d'une odeur et d'une saveur faibles. Sa dureté est intermédiaire entre celle de l'argent et celle du cuivre. Son coefficient de dilatation (0,00002918) est plus élevé que celui du fer.

La résistivité du zinc comprimé est de 5,613 ohms-centimètres. La résistance d'un fil de 100 mètres de longueur et de 1 millimètre de diamètre est de 7,146 ohms ; celle d'un fil de 1 mètre pesant 1 gramme est de 0,4012 ohm. Le zinc coulé a une limite d'élasticité à la traction de 2,3. Sa charge de rupture à la traction est de 5,26. Son coefficient d'élasticité est de 9,5 à la traction et à la compression ; il est de 3,562 au cisaillement. Son allongement proportionnel à la limite d'élasticité (traction) est de 0,0002⁴.

Le zinc pur, plongé dans l'eau froide acidulée, est lentement attaqué ; cela résulte de la formation d'une mince couche d'hydrogène adhérant au métal et empêchant le contact avec le liquide. L'attaque est très rapide lorsque le zinc est en contact avec un métal comme le cuivre ou le plomb.

Lorsque, dans certains usages courants, on emploie de la tôle, il est nécessaire de recouvrir cette tôle de plusieurs couches de peinture qu'il faut renouveler au bout de quelque temps pour empêcher la rouille de se former. Il n'en est pas de même avec le zinc, qui, comme on vient de le voir, s'oxyde superficiellement au bout de quelques jours et garantit de toute détérioration la masse du métal.

Les toitures en zinc sont d'un entretien facile. On les établit avec des feuilles dont les numéros varient avec la résistance que l'on désire obtenir. On trouve dans le commerce des feuilles de 2 mètres de longueur avec des largeurs différentes.

Pour mesurer ou contrôler l'épaisseur d'une feuille de zinc, on se sert d'un palmer. On doit opérer en plusieurs points de la feuille, afin de s'assurer de la régularité du laminage.

Le tableau suivant est adopté par les fabricants ;

NUMEROS	ÉPAISSEUR DES FEUILLES en centièmes de millimètre	DIMENSIONS ET POIDS DES FEUILLES			POIDS DU MÈTRE superficiel	EMPLOIS
		$l = 0{,}50$ L $= 2{,}00$	$l = 0{,}65$ L $= 2{,}00$	$l = 0{,}80$ L $= 2{,}00$		
	mètre	kilog.	kilog.	kilog.	kilog.	
9	0,00045	3,15	4,10	5,00	3,65	
10	0,00051	3,50	4,55	5,60	3,50	Lampes, lanternes, ferblanterie en général, revêtements hydrofuges pour murs d'appartements.
11	0,00060	4,05	5,25	6,50	4,05	
12	0,00069	4,60	6,00	7,40	4,60	Objets de ménage, descentes d'eau, couvertures de hangars, saillies, corniches, ornements.
13	0,00078	5,20	6,75	8,30	5,20	
14	0,00087	5,75	7,45	9,20	5,75	Toitures.
15	0,00096	6,65	8,65	10,65	6,65	Couvertures de monuments, chéneaux, caisses d'eau, bains de siège, baignoires, doublage de navires.
16	0,00110	7,55	9,80	12,10	7,55	
17	0,00123	8,45	11,00	13,55	8,45	Parois de baignoires, doublage de navires.
18	0,00136	9,40	12,20	15,00	9,40	
19	0,00141	10,30	13,35	16,45	10,30	
20	0,00166	11,20	14,55	17,90	11,20	
21	0,00185	12,45	16,20	19,90	12,45	
22	0,00202	13,70	17,80	21,90	13,70	Pompes, cuves de papeterie, réservoirs, cristallisoirs de raffineries.
23	0,00219	15,00	19,50	23,90	15,00	
24	0,00237	16,25	21,10	26,00	16,25	
25	0,00256	17,50	22,70	28,00	17,50	
26	0,00268	18,75	24,40	30,00	18,75	
Surface de chaque feuille dans les diverses dimensions.		1,000	1,300	1,600		

Les feuilles de zinc de $0^{m},00087$ employées pour les toitures pèsent nues $5^{kg},75$ par mètre superficiel et 8 kilogrammes avec les accessoirès, tandis que la couverture en ardoises pèse 25 kilogrammes et celle en tuiles 85 kilogrammes environ. Chaque feuille de zinc porte généralement à l'un de ses angles sa marque de fabrique et son numéro d'ordre.

ANALYSE CHIMIQUE

Le zinc du commerce renferme toujours des impuretés. Le plomb, le fer et le cadmium sont les métaux que l'on se contente ordinairement de doser. Cependant, si un essai qualitatif décelait la présence en quantité notable de cuivre et d'arsenic, il conviendrait d'en tenir compte.

Voici les deux procédés le plus employés pour l'analyse industrielle de ce métal :

I. On prend un fragment de zinc du poids de 100 grammes que l'on met en suspension dans une solution d'acide sulfurique étendu. Quand la moitié environ du fragment est passée en dissolution, on enlève la partie restante et l'on filtre rapidement en lavant à l'eau distillée cette partie non dissoute. A ce moment, on est certain que toutes les impuretés sont restées au fond du vase dans lequel s'est faite l'expérience, ainsi que sur le filtre qui a reçu les eaux de lavage du fragment. Les métaux autres que le zinc n'entrent en effet en dissolution que quand la totalité de ce dernier a disparu. Dans ces conditions, il est facile de recueillir les parties métalliques autres que le zinc, de les laver, de les dessécher et de les peser. Par différence avec le poids du métal dissous, on a la teneur en zinc pur.

Pour connaître la nature et la teneur des impuretés, on dissout celles-ci dans l'acide azotique. On évapore à sec, on reprend par l'acide azotique très dilué. S'il y a de l'étain, on a un précipité d'acide métastannique dont le poids permet de calculer la proportion du métal.

Dans le liquide filtré, on précipite le plomb par l'acide sul-

furique. Le sulfate de plomb formé fait connaître la teneur en plomb.

Dans la solution restante, on ajoute un peu d'acide chlorhydrique et de l'eau. Un courant d'hydrogène sulfuré précipite le cadmium à l'état de sulfure. Si, toutefois, l'alliage contenait du cuivre, il faudrait effectuer la séparation du cuivre et du cadmium et ne pas attribuer exclusivement à ce dernier métal le sulfure pesé.

II. Ci-après une autre méthode d'analyse :

On traite 40 grammes de zinc par l'acide sulfurique étendu. Le résidu insoluble se compose de plomb, d'un peu de cadmium, d'étain, de cuivre, etc. On filtre. On lave le résidu que l'on traite par l'acide azotique. Si la dissolution est incomplète, le précipité est de l'acide métastannique. On le recueille par filtration et on le traite comme à l'ordinaire.

Dans la liqueur azotique restante on ajoute de l'acide sulfurique; on a un précipité de sulfate de plomb.

Dans la nouvelle liqueur filtrée on ajoute un peu d'acide chlorhydrique et on fait passer un courant d'hydrogène sulfuré ; il y a précipitation du cuivre (s'il en existe) et du cadmium. On filtre. On traite le précipité de sulfures par l'acide sulfurique. Le sulfure de cadmium se dissout et il reste du sulfure de cuivre insoluble, ce qui fait connaître la teneur en cuivre. On reprécipite dans la solution le cadmium à l'état de sulfure, comme on l'a déjà fait, et cette fois on a le cadmium seul.

Quant au fer, il se dose sur une prise spéciale, soit volumétriquement à l'aide d'une liqueur titrée de permanganate de potassium, soit gravimétriquement en le précipitant de ses solutions par l'ammoniaque.

Enfin le zinc s'obtient en ajoutant du carbonate de sodium qui donne un précipité de carbonate de zinc que la calcination transforme en oxyde de zinc. On peut encore l'obtenir par voie électrolytique ou volumétrique.

Des quantités relativement faibles de matières étrangères ont une grande influence sur les propriétés du métal. Ainsi le fer diminue la malléabilité du zinc; il le rend cassant.

Une teneur de 0,50 0/0 de plomb augmente au contraire la malléabilité. Le cadmium n'exerce pas d'influence fâcheuse. Le zinc servant à la galvanisation de tôles ou d'aciers ne doit pas contenir plus de 2 0/0 d'impuretés ni une teneur en fer supérieure à 0,5 0/0.

ESSAIS

Le zinc ne comporte qu'un petit nombre d'essais mécaniques.

Dans les constructions navales, les services réceptionnaires exigent un essai d'enroulement des feuilles sur un mandrin. L'essai se fait le plus souvent à froid. Par exemple, une feuille de zinc de 1 millimètre d'épaisseur enroulée sur un mandrin de 14 millimètres de diamètre ne doit pas se détériorer.

Quelquefois aussi on fait un essai de pliage. Les feuilles de 1 millimètre doivent se plier entièrement sans criques. Pour des feuilles plus épaisses le relèvement doit se faire à angle vif.

Quelques services ont l'habitude de poinçonner les feuilles. Cette opération doit se faire sans gerçures.

II. — BLANC DE ZINC

Un produit qui depuis quelques années a conquis une place importante parmi les peintures employées dans les travaux publics est assurément le blanc de zinc.

Les falsifications auxquelles est soumis ce composé sont les suivantes : additions de carbonate ou de sulfate de zinc, de céruse, de carbonate ou de sulfate de calcium, de sulfate de baryum. On les décèle par l'analyse. Voici comment on opère :

Analyse. — **Carbonate de zinc.** — Sur le blanc de zinc à l'état de poudre sèche, on verse un peu d'acide chlorhydrique. S'il y a effervescence, on en conclut à la présence d'un carbonate.

Pour doser l'acide carbonique, on se sert de l'appareil à dégagement de Berzélius et de Rose, et l'on conduit l'opération de la même façon qu'on le fait pour l'analyse d'un calcaire. Si la matière ne contient que du carbonate de zinc comme impureté, il est facile de calculer la quantité de ce sel. Dans le cas où il existe plusieurs carbonates, il faut déduire du poids trouvé l'acide carbonique qui leur correspond — ce qui exige pour chaque corps un dosage spécial — et attribuer la différence au carbonate de zinc.

Sulfate de zinc. — On traite 5 grammes de blanc de zinc par l'eau bouillante. Le sulfate de zinc se dissout entièrement. On filtre. La liqueur est additionnée d'un peu d'acide chlorhydrique, puis de chlorure de baryum. Il se produit un précipité de sulfate de baryum que l'on recueille et que l'on calcine. Du poids du précipité on déduit celui de l'acide sulfurique et, par suite, celui du sulfate de zinc correspondant.

Sulfate de baryum. — Cinq grammes de matière sont dissous dans un peu d'acide chlorhydrique étendu. Le sulfate de baryum insoluble est recueilli sur un filtre, puis lavé, séché, calciné et pesé.

Mais s'il y a, en outre, du sulfate de calcium, une partie de ce sel restée insoluble est pesée avec le sulfate de baryum. Dans ce cas, il convient de modifier la marche de l'analyse et de faire la séparation des deux sulfates au moyen d'une digestion prolongée du blanc de zinc avec du carbonate d'ammonium et un peu d'ammoniaque. Le carbonate de calcium précipité est alors dissous par l'acide chlorhydrique étendu ; le sulfate de baryum reste totalement insoluble.

Carbonate de calcium. — S'il existe du carbonate de calcium dans le blanc de zinc, la dissolution de ce dernier dans l'acide chlorhydrique donne du chlorure de calcium soluble. On précipite le calcium à l'état d'oxalate par l'addition d'oxalate d'ammonium. En calcinant énergiquement

l'oxalate de calcium précipité, on a de la chaux caustique CaO, ce qui permet de connaître la quantité de carbonate de calcium contenue. S'il y avait d'autres sels de calcium solubles dans l'acide chlorhydrique, il conviendrait de retrancher de la chaux totale trouvée la chaux qui correspondrait à ces sels.

Sulfate de calcium. — En cas de présence simultanée de sulfate de baryum et de sulfate de calcium, il a été indiqué plus haut (dosage du sulfate de baryum) le moyen de séparer ces deux corps. Dans la liqueur finale, le carbonate de calcium est redissous. On peut, dans cette liqueur rendue alcaline par l'ammoniaque, précipiter la chaux par l'oxalate d'ammonium. Une partie de cette chaux doit être attribuée au carbonate de calcium, l'autre partie concernant le sulfate de calcium.

L'analyse qui précède suppose le blanc de zinc à l'état de poudre sèche. S'il formait une pâte prête à être employée, il faudrait, au préalable, en opérer le lavage au moyen du sulfure de carbone ou de l'éther, de manière à le débarrasser de l'huile dont il est imprégné. Un autre mode de séparation consiste à porter une certaine quantité de cette pâte dans un fourneau à moufle pour brûler par le grillage la matière organique et ne conserver que les substances minérales.

Enfin, il y a souvent intérêt à connaître sur le chantier même si le blanc de zinc est l'objet d'une adultération excessive. Dans ce cas, on procède à l'essai suivant :

Dans un verre quelconque, on met un peu de matière en poudre. On verse de l'acide sulfurique étendu d'eau, puis on agite avec une baguette en verre. S'il y a dissolution complète et si le liquide reste absolument limpide, il y a toute chance pour que l'oxyde de zinc soit pur. Si la dissolution est incomplète et si le liquide présente une couleur laiteuse, c'est qu'il se trouve des substances étrangères. L'importance du résidu mesure le degré d'impureté du produit.

La circulaire des Travaux publics du 1er juin 1901 pres-

crit, dans les travaux de peinture exécutés pour le compte de l'Administration, la substitution du blanc de zinc au blanc de céruse, en raison des inconvénients que présente ce dernier produit pour la santé des ouvriers appelés à en faire usage.

Les effets de l'intoxication résultant de la fabrication ou de l'emploi de la céruse se traduisent, effectivement, au bout d'un temps variable, par un amaigrissement continu avec décoloration de la peau. Le visage jaunit, l'urine se colore en jaune foncé, les gencives se bordent d'un liséré gris bleuâtre, l'haleine devient fétide et la bouche éprouve une sensation de saveur sucrée. Souvent les malades sont atteints de névralgies dans les membres, de convulsions, de délire, de maux de tête, de vertiges et de perte momentanée de la vue. Enfin surviennent les *coliques saturnines* ou *coliques de plomb*. Une médication appropriée et rapide s'impose si l'on veut éviter une terminaison fatale.

Le blanc de zinc ZnO provient de l'oxydation directe du zinc fortement chauffé dans des cornues en terre. Les vapeurs brûlées par un courant d'air donnent naissance à de l'oxyde qui se dépose dans des caisses de grandes dimensions. Les premières parties recueillies ont un aspect pulvérulent ; elles sont désignées sous le nom de *blanc de zinc*. Celles qui se déposent ensuite sont floconneuses et très légères ; elles constituent le *blanc de neige*.

Dans les travaux publics, la peinture à l'huile est à peu près la seule employée. Les couleurs finement broyées sont délayées dans des huiles siccatives. L'huile d'œillette convient pour les tons clairs et l'huile de lin pour les tons foncés ; on fait aussi usage d'huile de noix.

La céruse se mélange avec de l'huile de lin. Elle forme alors une pâte blanche s'étalant au pinceau et couvrant bien les surfaces. On s'en sert aussi pour étendre les autres couleurs et leur donner de l'opacité.

Le blanc de zinc se délaye également dans l'huile de lin ordinaire que l'on rend quelquefois siccative par l'addition de 3 0 0 de son poids d'huile de lin préalablement chauffée à 200° avec du bioxyde de manganèse ou un sel

manganeux, tel que le résinate de manganèse. Pour la bonne exécution du travail, on se sert de brosses à soies longues et douces que l'on manie avec légèreté. Une peinture considérée comme résistant bien à l'action des agents atmosphériques est celle que l'on obtient en mélangeant de l'oxyde de zinc à une solution de chlorure de zinc marquant 58° Baumé et en ajoutant un peu de carbonate de sodium. Il se forme un oxychlorure blanc insoluble qui, appliqué sur le bois ou sur le fer, sèche en moins de deux heures et couvre autant que la céruse.

La densité du blanc de zinc est de 5,4 ; celle de la céruse est de 6,47.

Un mélange de 800 grammes composé de 500 grammes de blanc de zinc en poudre et de 300 grammes d'huile couvre une surface de 7 mètres carrés, tandis qu'un mélange de 750 grammes composé de 500 grammes de céruse en poudre et de 250 grammes d'huile couvre une surface de 5 mètres carrés. Autrement dit, il faut par mètre superficiel $0^{kg},114$ de peinture au blanc de zinc et $0^{kg},150$ de peinture à la céruse.

A poids égal, le blanc de zinc exige une plus grande quantité d'huile que le blanc de plomb. On admet qu'il faut une quantité d'huile qui est, dans le premier cas, supérieure d'un cinquième à celle nécessitée dans le second cas.

Une peinture couvrant d'autant moins que sa nuance se rapproche plus du blanc absolu, il est utile de passer une première couche de fond avec du blanc de zinc teinté de noir, ce qui donne une couleur gris perle clair, et de terminer par une deuxième couche au blanc de zinc pur.

Il résulte d'expériences comparatives de peinture au carbonate de plomb et à l'oxyde de zinc exécutées à l'annexe de l Institut Pasteur, sous les auspices de la Société de Médecine publique et de Génie sanitaire et de la Chambre syndicale des Entrepreneurs de peinture, que :

Les enduits s'emploient et se tiennent aussi bien avec l'une et l'autre peinture ;

Le pouvoir couvrant est sensiblement le même ;

La siccativité des teintes et enduits est la même tant à l'in-

térieur qu'à l'extérieur, la dessiccation s'opérant en un temps égal.

Ces essais ont été effectués en divers endroits, sur un mur recouvert d'un enduit en plâtre au panier, sur des persiennes en fer, sur des panneaux en tôle, sur des portes et poteaux en bois et sur la face intérieure d'un mur de grenier à fourrages. Les surfaces choisies ont été divisées en parties égales sur lesquelles on a appliqué une ou plusieurs couches de céruse ou de blanc de zinc, dans des conditions absolument identiques. Les quantités de produits, d'huile, d'essence et de siccatif employés ont été dosées.

La Société de la Vieille-Montagne fabrique plusieurs types d'oxyde de zinc qu'elle désigne sous les noms de :

Blanc de neige, s'employant pour le réchampissage des rosaces, pour les glacis et les marbres blancs, pour les cages d'escalier, vestibules et corridors ;

Blanc n° 1, utilisé dans les travaux soignés ;

Blanc n° 2, un peu moins blanc que le précédent ; il sert pour les premières couches, pour les travaux ordinaires et les ravalements ;

Gris pierre, donnant une teinte pierre gris clair convenant pour les tons un peu foncés et les couches d'impression des travaux ordinaires, ainsi que pour les ravalements, les pièces métalliques, les charpentes en fer, les machines, etc.

Moyens servant à différencier la céruse du blanc de zinc. — Lorsqu'une peinture est exécutée, il est très facile de reconnaître de quelle matière elle est composée. Pour cela on enlève d'abord, s'il y a lieu, le vernis qui la recouvre par un léger grattage de la surface. On laisse ensuite couler un peu de solution de sulfure d'ammonium. S'il y a de la céruse, il se produit une tache noire due à la formation d'un sulfure de plomb. Dans le cas où le blanc de zinc seul a été employé, il n'y a pas de tache appréciable.

Les mêmes réactions se manifestent avec les couleurs simplement broyées. De plus, la céruse donne avec l'iodure de potassium un précipité jaune d'iodure de plomb, et avec les acides une effervescence due au dégagement du gaz carbonique.

EXTRAIT DU CAHIER DES CHARGES GÉNÉRAL DU MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

ART. 24. — **Métaux divers.** — ... Le zinc est bien épuré et de la première qualité marchande.

ART. 26. — **Composition des peintures.** — Toutes les couleurs sont pures, fines et solides.

Elles sont broyées à la machine ou à la molette avec de l'huile de lin ou d'œillette.

Le mastic est composé de trois parties de blanc dit de *Bougival* et d'une partie de blanc de zinc broyée avec une partie d'huile de lin.

Pour l'emploi, les peintures sont détrempées à l'huile, en ajoutant, pour chaque kilogramme de couleur, les quantités de siccatif qui seront fixées par l'ingénieur, suivant les saisons, suivant la nature des surfaces à peindre, suivant que les peintures sont en première ou en deuxième couche. On ajoute une certaine quantité d'essence pour la couche d'impression des surfaces extérieures. Pour les peintures d'intérieur, l'addition d'une certaine quantité d'essence peut être tolérée.

Avec les couleurs claires, on emploie le siccatif en poudre à base de manganèse après l'avoir broyé à l'huile ; avec le minium et les couleurs foncées, notamment le noir, on emploie le siccatif liquide à base de plomb.

CHAPITRE XXVII

PLOMB. — CÉRUSE. — MINIUM

I. — PLOMB

Le plomb est un métal très malléable et très ductile. Un fil de plomb de 3 millimètres d'épaisseur se rompt sous une charge de 14 kilogrammes.

Suivant qu'il est à l'état fondu, forgé ou liquide, le plomb possède une densité de 11,34, 11,36 ou 10,64. Sa température de fusion varie de 325° à 340° selon sa pureté. A haute température, il laisse dégager d'abondantes vapeurs. Par fusion, il peut cristalliser en octaèdres réguliers.

Ses constantes physiques sont les suivantes :

Charge limite d'élasticité	Traction	plomb	1,05
		fil de plomb	0,47
Charge de rupture.....	Traction	plomb	1,3
		fil de plomb	2,2
Coefficient d'élasticité. Traction et compression.....		plomb	500
		fil de plomb	700
Coefficient d'élasticité.....	Cisaillement	plomb	187,5
		fil de plomb	262,5
Allongement proportionnel à la limite d'élasticité	Traction	plomb	0,00210
		fil de plomb	0,00067
Résistivité en ohms-cm.....		.....	19,140
Résistance d'un fil de 100^{m} de longueur et de 1^{mm} de diamètre, en ohms.....		.....	24,370
Résistance d'un fil de 1^{m} de longueur pesant 1^{gr}, en ohms.....		.....	2,227

Le plomb s'oxyde très rapidement à l'air. Sa surface se recouvre d'une pellicule grise de sous-oxyde Pb^2O. Il contient fréquemment des impuretés telles que le fer et le cuivre, mais en assez faible proportion d'ailleurs. Pour l'obtenir à l'état de pureté, on calcine de l'azotate de plomb qui donne un oxyde que l'on chauffe ensuite dans un creuset avec du charbon pulvérisé. Ses dissolvants principaux sont l'acide azotique et l'eau régale. Au chalumeau, les sels de plomb donnent un globule métallique.

Les eaux potables forment dans les conduites de plomb un dépôt de carbonate de plomb insoluble inoffensif pour la consommation. L'eau distillée et l'eau pluviale dissolvent en partie le métal ; d'ailleurs celui-ci se transforme successivement en oxyde, hydrate et carbonate. Aussi constate-t-on souvent une rapide détérioration des toitures en plomb et rejette-t-on de la consommation courante les eaux pluviales qui proviennent de ces couvertures.

Parmi les usages les plus importants du plomb, on citera les canalisations d'eau et de gaz, la soudure des plombiers, les plaques sur lesquelles reposent les poutres métalliques, les chéneaux, le revêtement intérieur des réservoirs. Les jardiniers se servent de fils de plomb pour fixer les branches d'arbres à leurs supports.

Les feuilles de plomb ordinairement employées pour les couvertures mesurent $3^m,90 \times 1^m,95$ et ont une épaisseur de $0^m,0038$ à $0^m,0045$. La longueur des feuilles laminées dépasse rarement 8 mètres. Quand on veut obtenir des épaisseurs très faibles, on coule le plomb sur une toile tendue et inclinée que l'on a préalablement graissée.

ANALYSE CHIMIQUE

L'analyse d'un plomb marchand ou d'un plomb d'œuvre s'effectue de la façon suivante :

On attaque 10 grammes de plomb d'œuvre ou 100 grammes de plomb marchand par de l'acide azotique étendu. On ajoute de l'acide tartrique. Par filtration on sépare le résidu insoluble composé de soufre et de silice.

On transforme le soufre du résidu en acide sulfurique soluble, et dans la liqueur filtrée on précipite cet acide par le chlorure de baryum. Le sulfate de baryum produit fait connaître la teneur en soufre et la différence avec le résidu total donne la silice.

Dans la liqueur filtrée obtenue après séparation du résidu insoluble, on verse de l'acide sulfurique et un peu d'alcool. On a un précipité de sulfate de plomb, ce qui permet de calculer la teneur en plomb.

Dans la nouvelle solution filtrée, on recherche le cuivre, le bismuth, l'antimoine, l'arsenic, le cadmium et l'argent.

Si un essai qualitatif avait fait reconnaître l'existence du fer et du zinc, on doserait ces métaux en se servant pour le premier métal d'une liqueur titrée de permanganate de potassium, et pour le second du sulfure de sodium.

S'il y avait du nickel, il conviendrait de le séparer du fer et du zinc, puis de le doser à l'état de sulfure de nickel.

ESSAIS

Le plomb ne se prête guère aux essais.

Cependant la Compagnie des chemins de fer de l'Ouest exige, pour la réception des tuyauxse rvant à la canalisation de gaz d'huile, que 20 mètres de tuyaux soient soumis pendant une heure à une pression hydraulique de 25 kilogrammes et ne donnent lieu au bout de ce temps à aucune déformation. En outre, une longueur de tuyau de $0^{m},50$ supportant pendant une minute une pression de 200 kilogrammes ne doit provoquer ni déchirure, ni rupture.

Une densité minima est d'usage pour la réception des balles de plomb dans les services de l'Artillerie. Le plomb étant le métal usuel le plus lourd, il est évident que l'incorporation de métaux étrangers n'aura d'autre résultat que d'abaisser sa densité. Pour faire l'essai, on prélève dans chaque saumon 500 grammes de plomb que l'on fond dans un creuset sous une couche de charbon en poudre. Après refroidissement, on découpe dans le lingot obtenu des cubes de 30 à 40 grammes, que l'on pèse au moyen de la balance

hydrostatique, d'abord dans l'eau, puis dans l'air. Le minimum de densité exigé est de 11,35.

On peut aussi faire ces déterminations sur des pièces finies de dimensions convenables, en ayant recours, suivant le cas, à une balance ou à une bascule.

II. — CÉRUSE

Depuis que les circulaires ministérielles ont interdit l'usage de la céruse dans les administrations publiques, l'intérêt qui s'attachait à la réception de ce produit a beaucoup diminué.

La détermination des éléments entrant habituellement dans la composition de la céruse commerciale se fait de la façon suivante :

L'acide carbonique se dose par dégagement de ce gaz au moyen de l'appareil de Berzélius et de Rose déjà décrit.

Le plomb se dose à l'état de sulfate par addition d'acide sulfurique dans la dissolution nitrique du métal.

Le fer se précipite à l'état d'oxyde ferrique au moyen de l'ammoniaque.

La chaux s'obtient à l'état d'oxalate de calcium, en ajoutant dans la liqueur filtrée provenant de l'expérience précédente de l'oxalate d'ammonium.

III. — MINIUM

Le minium est souvent falsifié par de l'oxyde de plomb qui diminue sa valeur. Les autres adultérations consistent surtout dans des additions de sulfate de plomb ou de baryum, de litharge ou de céruse.

L'essai industriel d'un minium comprend la détermination de l'humidité, du plomb total, des impuretés, du bioxyde de plomb, du protoxyde de plomb, du carbonate de plomb.

Humidité. — On pèse 2 grammes d'échantillon que l'on soumet pendant une heure à la température de 100° C. La perte de poids donne l'eau hygrométrique.

Plomb total. — A 2 grammes de minium, on ajoute de l'acide azotique dilué et un peu d'eau sucrée. Tout le minium se dissout. On précipite le plomb à l'état de sulfure par l'hydrogène sulfuré, puis on le dose pondéralement ou volumétriquement à l'aide d'une solution titrée de bichromate de potassium.

Impuretés. — Les impuretés forment un résidu insoluble, il est donc facile de les reconnaître et de les déterminer.

Bioxyde de plomb. — On traite 2 grammes de minium par l'acide azotique dilué sans addition de sucre. Le protoxyde de plomb se dissout, tandis que le bioxyde demeure insoluble. On filtre et on pèse après dessiccation. S'il y a des impuretés, il faut les défalquer.

Protoxyde de plomb. — C'est la différence entre le plomb total et le bioxyde de plomb, si toutefois il n'y a pas de carbonate de plomb; autrement il faut retrancher ce composé du chiffre obtenu.

Carbonate de plomb. — Dans le cas où ce corps existe, il se produit une effervescence lors de l'attaque du minium par l'acide. Alors on dose le gaz carbonique à l'aide de l'appareil de Berzélius et de Rose, mais en substituant l'acide azotique dilué à l'acide chlorhydrique pour éviter le dégagement de chlore qui se produirait autrement.

EXTRAIT DU CAHIER DES CHARGES GÉNÉRAL DU MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

ART. 24. — **Métaux divers.** — Le plomb pour scellements, le plomb laminé sont bien épurés et de la première qualité marchande.

ART. 26. — **Composition des peintures.** — L'emploi du blanc de céruse est interdit.

CHAPITRE XXVIII

ALUMINIUM, NICKEL ET LEURS ALLIAGES

I. — ALUMINIUM

L'aluminium, métal très ductile et très malléable, possède une chaleur spécifique égale à 0,202. Sa densité est de 2,56. Il est doué d'une grande sonorité. Il est bon conducteur de la chaleur. Sa conductibilité électrique est supérieure à celle du fer. Il fond à 625°. Il est peu altérable à l'air, car sa surface se recouvre d'un revêtement protecteur imperméable formé d'alumine. Les acides sulfurique et azotique ont peu d'action à froid sur ce métal, mais l'acide chlorhydrique le dissout très bien à la température ordinaire.

Les constantes physiques de l'aluminium sont les suivantes :

Charge de rupture	Traction	20,3
Coefficient d'élasticité	Traction et compression	6050
	Cisaillement	2531
Coefficient de dilatation linéaire		0,000023
Résistivité de l'aluminium recuit en ohms-cm		2,906

A l'état pur, l'aluminium s'emploie quand on a besoin d'une grande légèreté et d'une forte ténacité ; aussi utilise-t-on ces propriétés dans la confection d'embarcations démontables, de longues-vues, de lorgnettes de spectacle, etc., faites avec ce métal. En métallurgie, on s'en sert comme désoxydant pour l'affinage de l'acier.

Alliages. — Les principaux alliages d'aluminium sont formés par ce métal uni soit au silicium, soit au cuivre, soit au nickel. Suivant la proportion des corps entrant dans la composition des alliages, on les dénomme bronzes ou laitons d'aluminium.

ANALYSE CHIMIQUE

L'aluminium industriel renferme souvent du fer et du silicium et parfois du carbone et de l'azote.

Pour l'analyse, on prend 1 gramme du métal en limaille que l'on dissout par l'acide chlorhydrique étendu. On évapore à sec. On reprend par l'eau acidulée d'acide chlorhydrique. On porte à l'ébullition. On fait passer un courant d'hydrogène sulfuré. On filtre. On sépare ainsi la silice, le silicium graphitoïde et le sulfure de cuivre.

On fait bouillir la liqueur filtrée pour chasser l'hydrogène sulfuré. On additionne de quelques gouttes d'acide azotique pour peroxyder le fer. On étend la liqueur à 500 centimètres cubes avec de l'eau distillée, sur lesquels on prélève 100 centimètres cubes pour doser l'aluminium. Cette portion est portée à l'ébullition. On y verse de l'ammoniaque. Il se produit un précipité d'alumine et d'oxyde ferrique.

Sur une prise spéciale, on dose l'oxyde ferrique en se servant d'une liqueur titrée de permanganate de potassium. On retranche enfin la teneur trouvée du poids total d'alumine et d'oxyde ferrique, ce qui donne la teneur en alumine seule et, par conséquent, l'aluminium.

ESSAIS

Les essais mécaniques effectués sur l'aluminium et ses alliages ne sont pas assez nombreux pour que l'on ait songé à fixer des conditions déterminées pour leur réception, comme on l'a fait pour les métaux ferreux et cuivreux. Aussi emprunte-t-on à ces derniers métaux les méthodes d'essais pouvant faire apprécier leurs qualités.

Des essais de traction faits à l'usine de Froges ont donné pour l'aluminium coulé une résistance de 10 kilogrammes avec un allongement variant de 10 à 13 0/0 et, pour l'aluminium forgé, la même résistance avec un allongement de 20 0/0.

Des essais effectués sur les alliages d'aluminium ont fourni les chiffres suivants :

		R	A 0/0
Aluminium.....	à 6-10 0/0 de Si	25 k.	> 10
Bronze d'aluminium.	à 2 0/0 Cu	16 k.	18
—	à 3-5 0/0 Cu	18 k.	4
—	au nickel	50 à 75 k.	30

II. — NICKEL

Le nickel présente une cassure fibreuse. Sa densité, qui est en général de 8,27, atteint 8,66 par l'écrouissage. Il est ductile, malléable et magnétique. Il ne s'oxyde pas à l'air froid, mais il s'oxyde à une température élevée. Il se dissout dans les acides sulfurique et chlorhydrique. Dans l'acide azotique concentré, il devient passif.

Ses constantes physiques sont les suivantes :

Coefficient de dilatation linéaire.....	0,00001279
Résistivité en ohms-cm.....	6,935

Sa charge de rupture par traction peut atteindre 60 à 70 kilogrammes par millimètre carré de la section primitive du barreau avec un allongement de 10 0/0.

Alliages. — Le nickel s'allie au cuivre en toutes proportions. Il constitue le maillechort et le pacfong argentan.

Il s'allie aussi au fer pour former les aciers au nickel ou les ferronickels.

ANALYSE CHIMIQUE

Le nickel du commerce est souvent impur. Il contient de l'arsenic, du soufre, du cobalt et du fer.

Pour en faire l'analyse, on met dans un creuset de porcelaine vernie quelques grammes de nickel en limaille avec un mélange de carbonate de sodium et de soufre. On introduit ce creuset dans un creuset en terre plus grand contenant une couche de charbon de bois en poudre. On chauffe graduellement jusqu'à la fusion ; on laisse refroidir. Il s'est formé un culot contenant les corps ci-dessus désignés, sauf l'arsenic qui s'est réuni en une scorie sulfureuse distincte. On sépare le culot de la scorie.

On dissout la scorie dans l'eau chaude. On ajoute de l'acide chlorhydrique. On a un précipité de sulfure d'arsenic et de soufre. On fait bouillir, puis l'on filtre. On lave le précipité à l'eau chaude ; on le redissout dans l'eau régale et l'acide hypochloreux. On ajoute de l'eau ammoniacale, du chlorure d'ammonium et du sulfate de magnésium, ce qui donne, au bout de quelques jours, un précipité complet d'arséniate ammoniaco-magnésien que l'on recueille et duquel on calcule la teneur en arsenic.

Quant au culot de sulfures, on le traite par l'eau régale qui le dissout. Par filtration, on sépare le soufre insoluble. On évapore à sec le liquide filtré, on reprend par l'eau acidulée d'acide chlorhydrique. On précipite le cuivre par l'hydrogène sulfuré. On filtre. On fait bouillir le filtrat pour le débarrasser de l'excès d'hydrogène sulfuré ; on ajoute de l'ammoniaque qui précipite le fer. La liqueur filtrée ne renferme plus alors que le cobalt et le nickel.

Si l'un des métaux, cobalt et nickel, est en faible quantité par rapport à l'autre, on en fait la séparation par la méthode de Fischer basée sur la propriété que présente le nitrite de potassium de précipiter le cobalt à l'état de nitrite de sesquioxyde. La liqueur est concentrée par évaporation. On la neutralise par la potasse si elle est acide. On élimine la potasse en excès par l'acide acétique, on ajoute une solution

concentrée de nitrite de potassium ou de sodium. Sous l'action de l'acide acétique libre, une partie de l'acide nitreux transforme le cobalt en sesquioxyde ; un sel double se forme et se dépose. Le cobalt est entièrement précipité. On filtre. On lave le précipité avec une dissolution d'acétate de potassium, puis avec de l'alcool. On le redissout ensuite dans l'acide chlorhydrique et on ajoute de la potasse qui précipite l'oxyde de cobalt. Connaissant la teneur en cobalt, il est facile d'en conclure la teneur en nickel.

ESSAIS

Le nickel pur est rarement essayé. Les essais mécaniques (essais de traction et d'emboutissage) portent plutôt sur les alliages de nickel.

Les balles de fusil (20 Ni + 80 Cu) offrent, à l'état brut, une résistance de 28 à 31 kilogrammes avec un allongement de 25 à 35 0/0 et, à l'état laminé, une résistance de 60 kilogrammes avec un allongement de 3 à 4 0/0 sur le métal écroui (Baclé).

L'alliage à 20 0/0 de nickel sert aussi comme plaques de foyers de locomotives.

Le nickel s'emploie surtout plaqué sur feuilles de fer soumises ensuite au laminage et comme dépôt électrolytique.

En ce qui concerne les aciers au nickel, on se reporte au chapitre XXIV (*Aciers spéciaux*).

CHAPITRE XXIX

VERRES

L'industrie du verre, jadis tributaire de l'habileté des ouvriers verriers, lesquels se considéraient non sans raison comme de véritables artistes professionnels, subit une évolution par suite des progrès incessants, conséquence obligée des perfectionnements apportés à l'outillage et aux procédés de fabrication.

Cette industrie ne veut plus se contenter de la seule fabrication des verres à vitres, des glaces, de la gobeletterie. Elle entre hardiment en concurrence avec les matériaux de construction utilisés de longue date et a même la prétention de se substituer à eux dans un certain nombre de cas.

Le verre présente des propriétés spéciales. C'est un corps généralement transparent, doué d'un éclat caractéristique désigné sous le nom d'*éclat vitreux*. Il est dur et cassant. Une chaleur progressive le fait passer de l'état solide à l'état visqueux, puis à l'état fondu.

Le verre ordinaire est un silicate bibasique formé de silicate de potassium (ou de sodium) et de silicate de calcium. Le cristal est aussi un sel double composé de silicate alcalin et de silicate de plomb. Considérés isolément, ces silicates ne donnent pas de verres utilisables, soit à cause de leur solubilité dans l'eau (silicates alcalins), soit en raison de la cristallisation toujours à craindre (silicate de calcium) dans une semblable matière.

Les verres employés dans la construction rentrent dans la catégorie des verres ordinaires. Lorsqu'on les laisse pendant un certain temps à une température voisine de leur point de

fusion, ils perdent leur transparence. On dit alors qu'ils se *dévitrifient*. Les cristaux de wollastonite qui se forment sont enchevêtrés, blancs, opaques. MM. Appert et Henrivaux ont montré dans le verre à bouteilles, où la vitrification est très marquée, l'existence de cristaux de pyroxène plus ou moins ferrugineux. Ce verre devient blanc, opaque, très dur, presque infusible; on l'appelle alors *porcelaine de Réaumur*.

Le verre est inaltérable à l'air sec, mais il est attaquable à l'air humide. Ce fait s'observe lorsqu'on examine les vitres des bâtiments en état de vétusté.

Il est aussi attaqué par l'eau froide qui dissout une partie de l'alcali. Avec l'eau bouillante cette action est bien plus rapide. Une expérience simple en convainc facilement. On fait bouillir de l'eau quelques instants avec du verre pulvérisé. La teinture rouge de tournesol vire au bleu, ce qui démontre l'alcalinité de la matière. On constate très souvent l'altération des flacons contenant des matières alcalines.

La coloration des verres s'obtient par l'addition de certains oxydes métalliques. Elle diffère suivant que les verres sont à base de potasse ou de soude. Le tableau ci-dessous donne quelques indications à cet égard[1] :

OXYDE COLORANT	VERRES A BASE DE		
	POTASSE	SOUDE	PLOMB
Argent	jaune ou orange	jaune ou orange	—
Chrome (sesqui)	vert jaunâtre franc	vert d'herbe	vert rougeâtre
Cobalt (proto)	bleu verdâtre	bleu violacé	bleu pur
Cuivre (proto)	rouge pourpre	rouge pourpre jaune	rouge sang
— (bi)	bleu céleste	bleu ciel verdâtre	vert
Fer (proto)	bleu verdâtre	vert bleuâtre	vert jaunâtre
— (sesqui)	vert bouteille jaune	vert bouteille	vert jaune sombre
Manganèse (bi)	améthyste brillant	violet rougeâtre sombre	violet rougeâtre
Nickel (proto)	améthyste sombre	violet jaunâtre	violet bleu
Or (Cassius)	rouge ou rose	bleu brun par réflexion	rouge ou rose
Urane	jaune serin	vert jaunâtre	topaze
—			
Charbon et soufre	jaune d'or	jaune pâle	noir
Antimoniate de plomb	blanc transparent à chaud	blanc opaque	orange opaque

1. *Verre et verrerie*, L. Appert et J. Henrivaux.

Par la facilité avec laquelle il prend toutes espèces de formes, le verre devait naturellement entrer en concurrence à un moment donné avec d'autres matériaux de construction. Son adaptation aux dallages résulte de l'obtention de figures géométriques. Ce système de revêtement résolvait du même coup l'éclairage naturel des sous-sols.

Les dalles en verre ont une assez grande épaisseur, ce qui permet d'obtenir une résistance convenable. Le coefficient de rupture qui a été exigé pour le plancher dallé de la gare des Invalides a été fixé à 250 kilogrammes par centimètre carré.

Verre armé. — Les résultats satisfaisants obtenus avec le ciment et le béton armés devaient aussi conduire à essayer d'appliquer au verre ce système mixte, afin d'en augmenter la résistance. Nombreuses ont été les tentatives en vue de l'incorporation du fer et de l'acier dans la masse vitreuse. Ce n'est qu'en ces dernières années que l'on est parvenu à vaincre définitivement cette difficulté.

L'idée première de la fabrication du verre armé paraît devoir être attribuée à l'Américain Hyatt, mais les essais auxquels se livra ce précurseur restèrent infructueux. D'autres expériences suivirent. La question ne devint véritablement pratique que le jour où un compatriote de Hyatt, M. Shuman, arriva à insérer à l'aide d'un dispositif spécial un réseau métallique dans le verre en fusion amené à un degré de fluidité convenable.

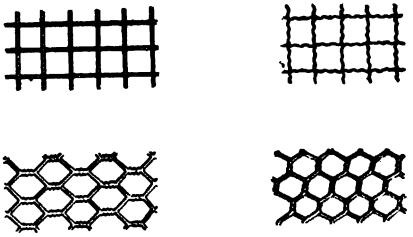

Fig. 168. — Treillis pour verre armé.

Pendant cette période, des recherches basées sur une autre conception étaient poursuivies par MM. Bécoulet et Bellet. M. Appert reprit ces essais, perfectionna certains détails des opérations et arriva au résultat cherché par l'interposition d'un treillis métallique entre deux plaques de verre laminées (*fig.* 168).

Depuis cette époque des modifications plus ou moins importantes ont été apportées soit au procédé Appert en usage à la Société de Saint-Gobain, soit au procédé Shuman adopté par la fabrique de Jeumont. Ces systèmes peuvent être considérés comme les deux procédés-types actuels.

Quelle que soit la façon dont on obtient le verre armé, deux propriétés essentielles caractérisent ce *matériau :* ce sont la cohésion et la ténacité. Lorsque, par suite d'un accident quelconque, le verre armé se rompt, les fragments qui en proviennent sont retenus par adhérence au treillis intérieur et ne peuvent se séparer que si l'on coupe ce réseau métallique. On voit immédiatement les avantages qui découlent de ce fait en cas d'incendie, où non seulement les éclats de verre ne risquent pas de blesser les personnes placées dans la zone dangereuse, mais empêchent le passage des flammes à travers la masse, comme l'ont prouvé des expériences faites en présence de commissions officielles.

La résistance moyenne du verre laminé est de 210 kilogrammes, tandis que celle du verre armé atteint 400 et même 600 kilogrammes par centimètre carré (F. Siemens).

On a vu plus haut que l'on utilisait le fer ou l'acier pour la confection du treillis métallique. On a renoncé, en effet, à employer l'acier au nickel, quoique le coefficient de dilatation de celui-ci soit analogue à celui du verre ordinaire ; on lui préfère en général le fil d'acier ordinaire poli semblable à celui qui est employé dans les cordes à piano. Pour donner une idée du soin que l'on doit apporter à la conservation, on dira que le réseau métallique une fois construit doit être enveloppé dans du papier de soie, puis disposé dans des caisses hermétiquement closes, afin de le soustraire à l'humidité qui en déterminerait rapidement l'oxydation. Il faut éviter aussi le contact des mains ou des corps gras. Les

réseaux ne sont retirés de leur enveloppe qu'au moment de leur emploi.

Les dimensions de ces réseaux sont variables. C'est ainsi que certaines verreries ou glaceries emploient des mailles de 10, 20, 25 millimètres avec fils tordus ou non de 9 dixièmes et de 6 dixièmes de millimètre.

Pour son incorporation, le réseau est tendu en tous sens, de façon à le rendre plan et enroulé sur un cylindre. On le déroule au moment opportun pour l'immerger dans le verre fondu. C'est le procédé par insertion.

On peut aussi l'étendre sur un plan que l'on incline à volonté ; c'est le procédé par interposition.

Le verre armé s'emploie dans la construction de marches d'escaliers. On assure ainsi l'éclairage par en dessous. Il sert encore pour l'établissement de soubassements dans les devantures de magasins ; il se prête avec une grande facilité à une décoration artistique. De semblables soubassements peuvent servir en outre comme enseignes lumineuses par l'adjonction d'un éclairage intérieur.

Il peut s'employer comme vitrages d'écoles ou de locaux pour réunions ou encore comme marquises, vérandas, terrasses, halls, toitures d'ateliers, etc.

Tuiles en verre. — Les greniers ou locaux industriels qui possèdent des toitures opaques se trouvent dans une obscurité relative. Ils peuvent être rendus lumineux par l'adoption partielle de tuiles en verre analogues aux tuiles en terre cuite du même modèle servant à la couverture.

On se rend compte immédiatement de la commodité qui résulte de l'association de tuiles opaques et de tuiles transparentes.

Pierre de verre. — Le produit connu sous ce nom s'obtient en chauffant pendant une heure dans un moule en fonte des poudres provenant de débris de verres soigneusement triés et lavés. Une dévitrification se produit. Il y a ramollissement de la masse que l'on porte ensuite quelques instants à la température de 1.300°. La masse chaude est alors comprimée sous une presse hydraulique ; on en effec-

tue le moulage. On recuit enfin à une température suffisante pour assurer la stabilité de la masse et la préserver ainsi de l'instabilité de l'équilibre moléculaire. Il ne reste plus qu'à en faire le démoulage.

Pendant l'opération, on empêche l'adhérence du verre aux parois intérieures du moule en interposant entre ces deux parties un moule en papier qui, par sa combustion, donne une pellicule de carbone isolatrice.

Suivant la composition des verres employés on obtient un produit d'aspect variable. Le grain est plus ou moins gros; il offre une certaine ressemblance avec celui des roches naturelles.

La résistance à l'écrasement est de 2.023 kilogrammes par centimètre carré.

Des essais de gélivité ont donné de bons résultats. Il en est de même des essais d'usure par frottement. On a aussi obtenu des chiffres satisfaisants dans les essais de résistance au choc et à l'arrachement.

On connaît l'emploi de cette pierre dans les gares du Métropolitain. Peut-être, à cause de l'usure et du glissement facile qui en résulte, eût-il été préférable de réserver exclusivement ces matériaux aux revêtements et d'éviter les escaliers en verre où la circulation est intense!

Un autre produit spécial analogue à la pierre de verre, la marblite, est fabriqué en Belgique. Son aspect est dû à un mélange de verres diversement colorés; ce mélange est fondu, puis moulé.

Tuyaux métalliques à revêtement intérieur en verre. — Les tuyaux en métal sont très souvent attaqués par les liquides corrosifs. Le ciment que l'on applique sur les parois intérieures des tuyaux a souvent une faible adhérence. Aussi a-t-on cherché à employer le verre à la place du ciment.

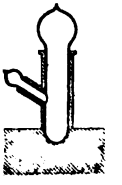

Fig. 169. Moule pour tuyaux en verre.

Le procédé Bergier consiste à appliquer directement le verre sur le tuyau par un soufflage progressif. Le verre en fusion est introduit à l'intérieur du tuyau porté au rouge. Par un soufflage convenable, le verre prend finale-

ment la forme indiquée par la figure 169, on arrive ainsi à lui faire épouser la paroi intérieure du tuyau.

Prismes Luxfer. — Le mauvais éclairage des rez-de-chaussée ou chambres basses sis dans les rues étroites des villes est le plus souvent combattu par des panneaux réfléchissants placés à l'extérieur. On peut aussi avoir recours à des plaques de verre spéciales remplaçant partiellement les vitres des devantures ou des fenêtres. La partie extérieure de ces plaques est formée par une surface brisée à vives arêtes, autrement dit par une succession de prismes accolés les uns aux autres. Cet ensemble est connu sous le nom de prismes Luxfer.

Pour éclairer une chambre, on choisit des prismes tels que la réfraction pour la partie supérieure s'exerce suivant

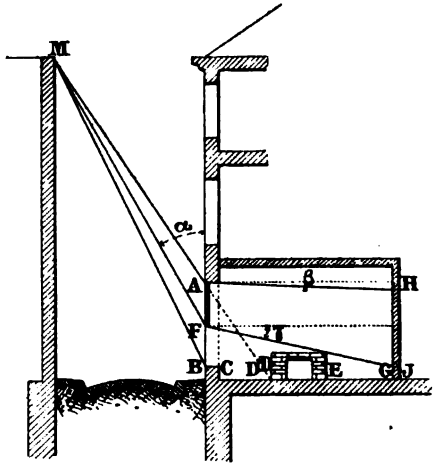

Fig. 170. — Application des prismes Luxfer.

une droite située au-dessus de l'horizontale ($\delta = 25$ à $45°$), et pour la partie inférieure suivant l'horizontale elle-même.

S'il s'agit, d'autre part, d'éclairer plutôt une partie déterminée de la pièce, par exemple un bureau situé en DE au rez-de-chaussée d'une habitation (*fig.* 170), on divise la baie AB

en deux parties, l'une supérieure AF composée de prismes Luxfer, l'autre FB fermée par des vitres ordinaires. On voit que par l'adjonction de prismes on réfracte le rayon lumineux MF suivant FG par exemple, et le rayon MA suivant une direction AH jugée convenable. La section éclairée, qui, dans le cas d'une vitre ordinaire, était ABCD, devient avec le système mixte ABCJH.

Théoriquement, on devrait disposer d'une vitre présentant un nombre considérable de prismes différents. Pratiquement, on se contente d'un nombre limité de modèles réunissant le mieux possible les conditions exigées.

Les verreries belges du Val-Saint-Lambert détiennent le monopole de la fabrication des prismes Luxfer.

La Société de Saint-Gobain fabrique des verres prismatiques losangés qui, s'ils ne permettent pas d'obtenir un rendement théorique aussi grand qu'avec le système précédent, offrent sur lui l'avantage de la commodité et de la simplicité.

Verres spéciaux. — Des verres fabriqués spécialement, tels que verres perforés ou imprimés, glaces platinées, opalines, silichromées, etc., sont aussi quelquefois employés; mais, comme ils n'ont qu'un rapport indirect avec la construction, on se contentera de les mentionner.

CHAPITRE XXX.

EAUX POTABLES

Une eau est considérée comme potable, c'est-à-dire propre à l'alimentation humaine et aux usages domestiques, lorsqu'elle est fraîche, limpide, inodore, dépourvue de saveur désagréable, exempte de substances étrangères et nuisibles, suffisamment aérée ; elle dissout facilement le savon et cuit bien les légumes.

Limpidité. — La limpidité se constate en versant dans une éprouvette à pied un certain volume d'eau (50 ou 100 centimètres cubes) et en la comparant à un même volume d'eau distillée versée dans une éprouvette identique. L'eau trouble est suspecte, car elle contient de l'argile en suspension ou des matières organiques. L'examen se fait en regardant par la tranche.

Les bonnes eaux sont transparentes; sous une grande épaisseur elles paraissent bleues. Les eaux médiocres sont verdâtres, les eaux de mauvaise qualité sont vert foncé, grisâtres, terreuses, brunâtres ou jaunâtres.

Fraîcheur. — La température d'une eau prise à la source ou au robinet doit être comprise entre 7 et 16°. Au-dessous de 5°, l'eau est froide, désagréable et dangereuse à cause de l'irritation de la muqueuse digestive qu'elle provoque et des répercussions fâcheuses qu'elle peut produire sur la santé. Au-dessus de 16°, elle est tiède, fade et nauséabonde.

Odeur. — Cinquante centimètres cubes d'eau sont versés dans un flacon rodé à l'émeri que l'on bouche, puis que l'on place dans un bain-marie à la température de 40° pendant une demi-heure. On ne doit constater aucune odeur ou du moins l'odeur doit être faible.

Saveur. — On compare la saveur de l'eau à expérimenter à celle de l'eau distillée qui possède un goût fade et désagréable. On reconnaît immédiatement si la différence est notable. La saveur doit être franche et non salée.

Matières étrangères. — Une eau de bonne qualité renferme de 0gr,13 à 0gr,50 de substances minérales par litre.

Gaz. — Une bonne eau potable contient de 25 à 50 centimètres cubes de gaz par litre. Ces gaz sont dans la proportion de 8 à 10 0/0 d'anhydride carbonique, 30 0/0 d'oxygène et 60 0/0 d'azote.

L'analyse chimique est le seul critérium permettant de connaître la valeur alimentaire d'une eau. On peut quelquefois se contenter de déterminer les éléments, mais le plus souvent il est indispensable d'effectuer le dosage de ces éléments; d'où deux procédés : l'analyse qualitative, l'analyse quantitative.

ANALYSE QUALITATIVE

Le prélèvement d'une eau destinée à l'analyse doit être fait, avec le plus grand soin, dans des bouteilles de verre bien propres, bouchées à l'émeri ou avec des bouchons neufs, et rincées plusieurs fois avec cette eau.

Recherche des acides. — On constate de la façon suivante la présence des acides.

Acide sulfurique (sulfates). — On additionne l'eau de quelques centimètres cubes d'acide chlorhydrique, on ajoute

une solution de chlorure de baryum. On a un précipité blanc de sulfate de baryum.

Acide chlorhydrique (*chlorures*). — L'eau acidulée par l'acide azotique donne avec une solution d'azotate d'argent un précipité blanc de chlorure d'argent.

Acide carbonique libre et bicarbonates. — L'eau de chaux détermine un précipité blanc de carbonate de calcium.

Acide sulfhydrique (*sulfures*). — On ajoute à l'eau du nitroprussiate de sodium, qui donne une coloration violette. L'azotate de plomb donne avec les sulfures et l'hydrogène sulfuré une coloration brune plus ou moins foncée.

Acide azotique. — Dans un verre de montre placé sur une soucoupe blanche, on met deux gouttes de l'eau à examiner et deux gouttes de solution de brucine. On ajoute quelques gouttes d'acide sulfurique. On a une coloration rouge.

On peut aussi laisser tomber quelques gouttes de l'eau à essayer dans de l'acide sulfurique contenant un peu de diphénylamine. L'eau devient bleue au contact des azotates.

Acide azoteux. — On verse dans l'eau 1 centimètre cube de solution de métaphénylène-diamine et 1 centimètre cube d'acide sulfurique étendu. Si au bout de quelque temps (une demi-heure au plus) on a une coloration brune, c'est l'indice de la présence d'azotites dans l'eau.

Recherche des métaux. — La présence des métaux dans une eau se constate de la manière indiquée ci-dessous :

Calcium. — Dans l'eau on verse du chlorure d'ammonium, de l'ammoniaque et de l'oxalate d'ammonium. On a un précipité blanc d'oxalate de calcium.

Magnésium. — Si l'on filtre de manière à séparer l'oxalate de calcium obtenu dans l'expérience précédente et que dans la liqueur on ajoute du phosphate de sodium, on a, au

bout de douze heures environ, un précipité blanc de phosphate ammoniaco-magnésien.

Potassium, sodium. — On verse dans l'eau un petit excès de baryte. Les métaux autres que les métaux alcalins et alcalino-terreux sont précipités à l'état d'oxydes et la chaux dissoute à la faveur du gaz carbonique passe à l'état de carbonate insoluble. On filtre. On précipite l'excès de baryte par le carbonate d'ammonium ; il y a également précipitation du calcium. On filtre. On évapore le liquide à siccité, on calcine le résidu dans lequel on recherche la présence du potassium et du sodium au moyen du tétrachlorure de platine et du pyroantimoniate de potassium.

Ammonium. — On constate la présence de l'ammoniaque en ajoutant quelques centimètres cubes de solution de carbonate de sodium et en agitant le mélange dans un flacon bouché à l'émeri. Après un repos de quelques heures le liquide clair est décanté et additionné de 1 centimètre cube de réactif de Nessler. On a une coloration jaune.

Plomb. — L'eau concentrée à un petit volume avec un peu d'acide acétique et d'acétate d'ammonium donne, si on ajoute un peu d'iodure de potassium, un précipité jaune d'iodure de plomb.

Cuivre. — Dans une eau concentrée et réduite à un faible volume, l'addition d'une solution de ferrocyanure de potassium donne un précipité brun.

Zinc. — Dans une eau semblable à la précédente, on verse un peu d'acide chlorhydrique et l'on fait passer un courant d'hydrogène sulfuré. Dans la liqueur filtrée, on ajoute de l'ammoniaque, on a alors un précipité blanc de sulfure de zinc.

Arsenic. — L'eau évaporée à sec donne un résidu que l'on reprend par quelques centimètres cubes d'acide sulfurique.

En soumettant la nouvelle liqueur étendue d'eau distillée à l'action de l'hydrogène naissant dans l'appareil de Marsh, on obtient des anneaux caractéristiques.

ANALYSE QUANTITATIVE

Les corps qui se trouvent généralement dans les eaux potables sont les suivants : le résidu total, les acides carbonique, chlorhydrique, sulfurique, azotique, azoteux, silicique, phosphorique, le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium, l'aluminium, le fer, le manganèse, l'ammoniaque, les matières organiques, les gaz, l'oxygène.

Souvent on se contente de doser le résidu total, les chlorures, les composés nitreux et les matières organiques.

Résidu total. — Dans un bain-marie on place une capsule de platine ou de porcelaine dans laquelle on a versé 100 centimètres cubes d'eau. On évapore à sec. On porte ensuite la capsule dans une étuve chauffée à 110° et on l'y laisse deux à trois heures. La différence entre le poids primitif et le poids final représente le résidu solide total.

Silice. — Cinq cents centimètres cubes d'eau auxquels on ajoute quelques centimètres cubes d'acide chlorhydrique sont évaporés à sec dans une capsule tarée. On porte à l'étuve chauffée à 130°. On reprend ensuite par l'acide chlorhydrique étendu qui laisse la silice insoluble que l'on sépare par filtration.

Alumine, oxyde ferrique, chaux et magnésie. — Dans la liqueur filtrée précédente on dose l'alumine, l'oxyde ferrique, la chaux et la magnésie en suivant la marche indiquée pour l'analyse des calcaires.

Potasse et soude. — Dans la liqueur filtrée obtenue après le dosage de la magnésie, on précipite l'excès d'acide phosphorique par l'acétate de plomb. On filtre. Dans la liqueur filtrée on fait passer un courant d'hydrogène sulfuré pour précipiter le plomb. On filtre. On évapore à sec la liqueur filtrée,

Une faible calcination du résidu volatilise les sels ammoniacaux. On transforme en sulfates et en chlorures les métaux alcalins qui se trouvent à l'état de carbonates, et on les pèse.

On peut d'ailleurs doser directement les métaux alcalins sur une prise d'échantillon spéciale au moyen de la méthode Péligot. On sépare d'abord la silice, puis on précipite tous les oxydes métalliques et l'acide sulfurique par l'eau de baryte. On fait passer un courant d'acide carbonique qui transforme le baryum et le calcium en carbonates insolubles. Le résidu fourni par l'évaporation du liquide filtré est repris par l'acide chlorhydrique, ce qui donne des chlorures alcalins que l'on pèse à l'état de siccité.

La séparation du potassium et du sodium s'opère, s'il est nécessaire, à l'aide du tétrachlorure de platine.

Ammoniaque. — L'azote se trouve sous forme d'ammoniaque libre ou de sels ammoniacaux et d'azote organique provenant des matières albuminoïdes.

Pour doser l'ammoniaque, on emploie le procédé de Schlœsing ou le procédé de Wanklyn. Par le procédé de Schlœsing, on distille 500 centimètres cubes d'eau avec 1 gramme de magnésium. L'eau ammoniacale distille et se rend dans une solution titrée d'acide sulfurique. Le procédé de Wanklyn consiste à comparer la coloration produite par le réactif Nessler dans l'eau essayée à celle que produit le même réactif dans des dissolutions de chlorure d'ammonium contenant des quantités connues de ce sel.

Acide sulfurique. — Dans 500 centimètres cubes d'eau légèrement additionnée d'acide chlorhydrique, on verse un excès de chlorure de baryum. Au bout de vingt-quatre heures, on filtre, on recueille le précipité de sulfate de baryum que l'on calcine et que l'on pèse.

Chlore. — On verse dans 500 centimètres cubes d'eau aiguisée d'acide azotique un peu d'azotate d'argent. On obtient un précipité de chlorure d'argent que l'on recueille sur un filtre. On lave, on dessèche et on pèse ce précipité.

On peut aussi employer le procédé suivant : Dans de l'eau

réduite par évaporation à un assez faible volume, puis versée dans un vase à saturation, on ajoute deux ou trois gouttes de solution de chromate de potassium. D'une burette graduée, on laisse tomber peu à peu une solution titrée d'azotate d'argent. On s'arrête à l'apparition d'une coloration rouge persistante. Cette coloration est due à la formation de chromate d'argent; elle indique qu'il n'y a plus de chlore libre dans la liqueur. Du nombre de divisions employées on déduit la teneur en chlore correspondante.

Acide azotique. — 1° On chauffe 1 litre d'eau que l'on ramène de cette façon à 25 centimètres cubes environ. On soumet ensuite ce liquide à l'action du chlorure ferreux en présence de l'acide chlorhydrique suivant le procédé de Schlœsing, lequel est basé sur la réaction suivante :

$$\underset{\text{Azotate métallique}}{2AzO^3M} + \underset{\text{Chlorure ferreux}}{6FeCl^2} + \underset{\text{Acide chlorhydrique}}{8HCl} = 3(Fe^2)Cl^6 + \underset{\text{Chlorure métallique}}{2MCl} + \underset{\text{Eau}}{4H^2O} + \underset{\text{Bioxyde d'azote}}{2AzO.}$$

Chlorure ferrique

On recueille le bioxyde d'azote qui se dégage et on en déduit l'acide azotique correspondant.

2° On peut encore soumettre l'acide azotique à l'action de l'hydrogène naissant obtenu en faisant réagir la soude sur l'aluminium. L'acide azotique transformé en ammoniaque est alors dosé par le procédé de Wanklyn.

Acide azoteux. — La détermination de l'acide azoteux se fait en comparant la teinte jaune que prend l'eau, dans laquelle on verse 1 centimètre cube de solution de métaphénylène-diamine, avec les teintes que possèdent une série de types préparés en versant le même réactif dans des solutions titrées d'azotite de potassium (ou de sodium) à teneur croissante.

Gaz dissous. — Ces gaz s'extraient de l'eau soit par l'ébullition, soit par le vide.

1° *Par ébullition.* — On se sert de l'appareil Péligot, qui consiste en un ballon rempli d'eau auquel est adapté un tube se rendant dans une éprouvette placée sur la cuve à mercure; cette éprouvette contient elle-même du mercure jusqu'à sa partie supérieure. En faisant bouillir l'eau du ballon, les gaz se dégagent et viennent occuper la partie supérieure de l'éprouvette. On les dessèche à l'aide d'un morceau de coke imprégné d'acide sulfurique et on lit le volume occupé par les gaz. On absorbe ensuite l'anhydride carbonique au moyen d'une balle de coke imbibée de potasse caustique, puis l'oxygène avec une solution de pyrogallate de potassium.

2° *Par le vide.* — On extrait aussi les gaz en se servant du vide produit par une pompe à mercure. Ce procédé nécessite un appareil spécial dont on trouve la description dans les traités d'analyse chimique.

Oxygène. — Le procédé le plus simple pour le dosage de l'oxygène dissous consiste dans l'oxydation de l'oxyde ferreux en présence de la potasse ou de la soude.

Dans un flacon à large goulot rempli d'eau et fermé par un bouchon à trois tubulures, on fait passer un courant d'acide carbonique pour chasser l'air qui y est contenu. On verse ensuite par l'un des tubes 25 centimètres cubes d'une solution titrée de sulfate ferreux et 3 centimètres cubes d'une solution normale de potasse. On a un précipité d'oxyde ferreux. On laisse en repos pendant une demi-heure. Sous l'influence de l'oxygène dissous, l'oxyde ferreux se transforme en oxyde ferrique. On détermine enfin la quantité d'oxyde ferreux non transformée au moyen d'une solution titrée de permanganate de potassium en présence d'acide sulfurique normal.

Matières organiques. — *Méthode de Schulze-Tromssdorff.* — Cette méthode consiste à oxyder les matières organiques par le permanganate de potassium et à déterminer le volume d'une solution titrée de ce sel nécessaire à l'oxydation. Comme l'ammoniaque et l'acide azoteux agissent également

sur le permanganate, il faut tenir compte des petites quantités de ces composés que peut renfermer l'eau.

On fait bouillir 100 centimètres cubes d'eau de manière à réduire le volume à 30 centimètres cubes environ. On a ainsi chassé l'ammoniaque. On rétablit ensuite le volume primitif avec de l'eau distillée. On ajoute 1/2 centimètre cube de solution sodique et 10 centimètres cubes de solution de permanganate de potassium. On porte à l'ébullition pendant dix minutes. On verse dans l'eau, ramenée à la température de 60°, 5 centimètres cubes d'acide sulfurique et 10 centimètres cubes d'acide oxalique. Le permanganate est décoloré. Un excès d'acide oxalique reste dissous, puisqu'une partie du permanganate a été décomposée par les matières organiques. Cet excès est déterminé par une nouvelle addition de permanganate. On trouve ainsi le volume employé à l'oxydation des matières organiques. Ces matières organiques s'expriment en acide oxalique; de cette façon les résultats sont comparables entre eux.

Si l'eau renferme de l'acide azoteux, il faut en tenir compte et faire subir une correction au chiffre ci-dessus trouvé.

Méthode de M. Albert Lévy. — Cette méthode consiste à déterminer la proportion d'oxygène emprunté à une solution alcaline bouillante de permanganate de potassium.

Le Comité consultatif d'hygiène publique de France a décrit cette méthode dans les termes suivants :

« On introduit dans un ballon 100 à 200 centimètres cubes de l'eau à examiner. On y verse, pour chaque fraction de 100 centimètres cubes d'eau, 3 centimètres cubes d'une solution au dixième de bicarbonate de soude pur, puis 10 ou 20 centimètres cubes d'une solution de permanganate de potasse contenant par litre d'eau distillée $0^{gr},50$ de sel. (Il faut ajouter 10 centimètres cubes de permanganate pour chaque fraction de 100 centimètres cubes d'eau.)

« Le mélange est alors porté à l'ébullition entretenue exactement pendant dix minutes à partir du moment où le liquide commence à bouillir. La coloration du mélange, brun violacé au début, un peu plus rouge à l'ébullition, ne doit jamais virer au jaune; si cette coloration se produisait, ce

serait l'indice que la quantité de permanganate ajoutée est insuffisante, et il faudrait recommencer l'essai, soit en ajoutant une plus forte proportion (toujours à volume connu) de la liqueur titrée de permanganate, soit en diminuant la proportion d'eau soumise à l'analyse.

« Après refroidissement, il s'est formé un dépôt jaune brun, floconneux, d'oxyde de manganèse. On acidifie la liqueur en y versant 2 à 3 centimètres cubes d'acide sulfurique pur et on ajoute immédiatement 5 centimètres cubes d'une solution de sulfate ferreux ammoniacal ainsi composée :

Sulfate ferreux ammoniacal.....	20 grammes
Acide sulfurique pur.....	10 —
Eau distillée : Q. S. pour faire un litre de liqueur	

« La liqueur se décolore rapidement et devient tout à fait limpide. Quand ce point est atteint, on verse goutte à goutte, avec une burette graduée, de la solution titrée de permanganate de potasse jusqu'à production d'une teinte rosée persistant un moment. Le chiffre de cette lecture sert de *repère*.

« On recommence l'opération en doublant le volume de l'eau mise en expérience ; on opère exactement de la même façon, et la différence des lectures donne, cette fois, le poids du permanganate qui a fourni son oxygène à la matière organique.

« Connaissant la valeur en poids de l'oxygène disponible dans 1 litre de liqueur au permanganate, il est facile de calculer la quantité d'oxygène qui a été employé à brûler la matière organique dissoute dans l'eau. La liqueur de permanganate employée renfermant, par litre, un demi-gramme de sel sec et pur, le calcul indique que cette solution renferme 125 milligrammes d'oxygène capable d'effectuer des oxydations, soit $0^{mgr},125$ pour chaque centimètre cube. Il est d'ailleurs facile de vérifier l'exactitude du titre oxydant de la liqueur, en recherchant le nombre de centimètres cubes de cette liqueur nécessaire pour oxyder un poids connu d'acide oxalique sec et pur.

« Cette méthode, pas plus que les autres d'ailleurs, ne fournit relativement à la matière organique un chiffre abso-

lument exact; mais elle donne, par comparaison entre les eaux de différentes provenances, des renseignements constants et, par cela même, fort précieux. »

PROCÉDÉS RAPIDES D'ANALYSE

Les opérations décrites ci-dessus ne peuvent être effectuées que dans un laboratoire de chimie. On doit y avoir recours lorsqu'il s'agit d'un projet d'alimentation en eau potable d'un pays quelconque.

Mais dans nombre de cas une analyse aussi complète n'est pas indispensable. Il suffit simplement de connaître la pureté relative d'une eau. On peut alors employer les procédés suivants :

L'essai hydrotimétrique,
Le procédé de MM. Pignet et Hue,

qui n'exigent aucun apprentissage préalable et qui peuvent se faire avec un matériel restreint et peu dispendieux.

Essai hydrotimétrique. — Cet essai, imaginé par le Dr Clarke et perfectionné par MM. Boutron et Boudet, repose sur cette observation que si, dans une eau, on verse goutte à goutte une dissolution de savon, il se forme d'abord des grumeaux insolubles par la combinaison des acides gras du savon avec les sels de calcium et de magnésium ; une fois le précipité formé, l'addition d'une seule goutte de la solution donne à l'eau une onctuosité telle que l'agitation y produit immédiatement une mousse légère et persistante.

De ce qui précède, il résulte qu'il existe une relation entre le volume de la solution de savon nécessaire à l'obtention de cette mousse et la quantité de sels calcaires et magnésiens dissous dans l'eau. La dureté d'une eau peut se déterminer d'après le volume d'une solution de savon titrée nécessaire pour avoir une mousse persistante.

On appelle *dureté* ou *crudité* d'une eau la quantité de sels

calcaires ou magnésiens qu'elle tient en dissolution. La proportion plus ou moins grande de ces sels a pour effet d'empêcher ou de faciliter la cuisson des légumes ou la dissolution du savon.

La dureté totale *total hardness* est le degré hydrotimétrique de l'eau non bouillie.

La dureté permanente *permanent hardness* est le degré hydrotimétrique constaté après l'ébullition de l'eau, c'est-à-dire après dégagement de l'acide carbonique et précipitation du carbonate de calcium. Après le refroidissement du liquide, on recomplète le volume primitif par l'addition d'eau distillée, puis on détermine le degré.

Enfin la dureté temporaire *temporary hardness* est la différence entre la dureté totale et la dureté permanente.

Pour faire un essai hydrotimétrique, on emploie les trois solutions suivantes:

1° Une solution contenant 0gr,25 de chlorure de calcium par litre d'eau. Cette solution peut être remplacée par une autre contenant 0gr,55 de chlorure de baryum ou encore 0gr,59 d'azotate de baryum par litre d'eau;

2° Une solution de 1 gramme d'oxalate d'ammonium dans 60 centimètres cubes d'eau;

3° Une solution alcoolique de savon blanc de Marseille, ou mieux de savon médicinal dit amygdalin, préparée en dissolvant 100 grammes de savon dans 1.000 grammes d'alcool à 90°. On filtre, puis on ajoute à la liqueur filtrée 1.000 grammes d'eau distillée.

Fig. 171. Flacon hydrotimétrique

Le nécessaire hydrotimétrique comporte :

a) Un flacon bouché à l'émeri (*fig.* 171) gradué à 10, 20, 30 et 40 centimètres cubes.

b) Une burette ou hydrotimètre (*fig.* 172), comprenant une graduation spéciale de 0 à 57 divisions représentant des degrés. Un trait circulaire, placé au-dessus du zéro, indique, entre ces deux divisions, le volume de liqueur nécessaire pour faire mousser 40 centimètres cubes d'eau distillée. L'intervalle compris entre 0 et 2cc,4 est divisé en 23 parties égales et contient 2cc,4, soit 0cc,104 par degré hydrotimétrique.

La liqueur alcoolique de savon est composée de telle façon que chaque degré représente $0^{gr},1$ de savon neutralisé par 1 litre d'eau soumise à l'essai et corresponde à $0^{gr},0114$ de chlorure de calcium par litre.

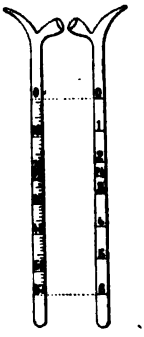

Fig. 172. — Burette hydrotimétrique.

c) Une pipette divisée en dixièmes de centimètre cube et un ballon jaugé de 50 centimètres cubes.

Avant de commencer un essai, il convient d'essayer la liqueur d'épreuve. Pour cela, on verse dans le flacon 40 centimètres cubes de la solution de chlorure de calcium. On laisse tomber goutte à goutte de l'hydrotimètre la solution alcoolique de savon. Si l'on a employé 22 divisions de cette liqueur, celle-ci est utilisable. Dans le cas contraire, on ajoute à cette liqueur de l'eau en quantité suffisante pour qu'un nouvel essai donne exactement 22 divisions.

Mode opératoire. — On s'assure tout d'abord que l'eau distillée n'exige pas plus, pour l'obtention d'une mousse persistante, que la quantité de liqueur savonneuse comprise entre les deux premiers traits de la burette. Ce fait vérifié, on verse dans le flacon 40 centimètres cubes de l'eau à essayer. On y ajoute, goutte à goutte, la solution de savon de la burette en agitant de temps à autre. Quand l'addition d'une goutte supplémentaire détermine par l'agitation une mousse légère de plus de 5 millimètres d'épaisseur et persistant au moins cinq minutes sans affaissement sensible, on s'arrête et on lit le nombre des divisions employées. Ce nombre indique le degré hydrotimétrique total de l'eau.

Si l'eau est trop chargée de sels calcaires ou magnésiens, on modifie légèrement les conditions de l'expérience. Suivant la proportion contenue, on prend 30, 20 ou 10 centimètres cubes de cette eau et on complète le volume à 40 centimètres cubes avec de l'eau distillée. Dans ce cas, le nombre trouvé doit être multiplié par $\frac{4}{3}$, 2 ou 4 pour avoir le degré réel

Si l'on constate qu'une eau titre 30° par exemple, on en déduit que 1 litre de cette eau décompose 30 décigrammes ou 3 grammes de savon. En outre, ce litre renferme une proportion de sels pouvant faire la double décomposition avec le savon, correspondant à

$$0^{gr},0114 \times 30 = 0^{gr},342$$

de chlorure de calcium.

Le tableau suivant donne quelques comparaisons qu'il est utile de connaître :

DÉSIGNATION DES EAUX	DEGRÉ HYDROTIMÉTRIQUE total	DÉSIGNATION DES EAUX	DEGRÉ HYDROTIMÉTRIQUE total
Eau distillée.....	0°	Eau de l'Allier, à Moulins.....	3,5
— de neige à Paris.	2,5	— de la Dordogne (à Libourne).....	4,5
— de pluie.....	3,5	— de la Loire.....	5,5
— du puits de Grenelle.....	9 à 12	— de la Somme.....	14
— du puits de Passy.	10 à 11	— du Beuvron.....	14,5
— de la Seine, à Ivry.	15 à 17	— du Rhône.....	15
— de la Seine, à Chaillot.....	19 à 23	— de l'Yonne (à Montereau).....	16
— de la Vanne.....	16 à 18	— du Cher (Vierzon)	17
— de la Dhuis.....	21 à 24	— de l'Isère.....	19
— de la Marne.....	19 à 23	— de l'Oise.....	21
— de l'Ourcq.....	30	— de la Durance...	22
— d'Arcueil.....	40 à 53	— de l'Escaut.....	24,5
— du Pré-Saint-Gervais.....	72	— de l'Oued-Medjerdah (Tunisie)...	38
— de Belleville.....	128	— puits de Bougival.	58,5

Ainsi, d'après les chiffres de ce tableau, il est facile de calculer que 1 mètre cube d'eau de Seine à Ivry nécessite de $1^{kg},500$ à $1^{kg},700$ de savon, tandis que la même quantité d'eau de Belleville en exige $12^{kg},800$, avant de produire un effet utile pour le savonnage du linge.

Détermination des sels de calcium, des sels de magnésium, de l'acide carbonique. — L'essai hydrotimétrique ne se borne pas

à donner le degré de crudité d'une eau. Il peut encore servir à faire connaître la quantité de sels de calcium, de sels de magnésium et d'acide carbonique que contient cette eau.

Il a été dit plus haut que les sels calcaires et magnésiens précipitent le savon et empêchent la formation de la mousse. Mais l'acide carbonique agit aussi sur la solution savonneuse en précipitant les acides gras sous forme de sels acides, lui-même se combinant avec une partie du métal alcalin du savon.

On commence par faire d'abord les quatre déterminations suivantes :

a) Le degré hydrotimétrique total;

b) Le degré après précipitation de la chaux par l'oxalate d'ammonium, l'acide carbonique restant en solution dans l'eau;

c) Le degré permanent après l'ébullition de l'eau, c'est-à-dire élimination de l'acide carbonique et précipitation des carbonates calcaires que l'acide carbonique maintenait en dissolution;

d) Le degré après ébullition et précipitation par l'oxalate d'ammonium des sels de calcium non précipités par l'ébullition.

On a déjà vu comment on déterminait le degré hydrotimétrique total *a*. Soit 27° le degré total d'une eau.

Pour la deuxième détermination *b*, on prend 50 centimètres cubes d'eau, auxquels on ajoute 2 centimètres cubes d'oxalate d'ammonium. On agite vivement le liquide à l'aide d'une baguette de verre, on laisse reposer une demi-heure et on filtre. On prélève 40 centimètres cubes de la liqueur filtrée ainsi débarrassée des sels de calcium. Soit 13° le degré observé correspondant à cette solution.

Pour obtenir *c*, on remplit d'eau le ballon jusqu'au trait circulaire, on porte à l'ébullition pendant une demi-heure. Il y a dégagement de l'acide carbonique et précipitation du carbonate de calcium. Après refroidissement, on rétablit le volume primitif par addition d'eau distillée. On mélange, on filtre et, sur 40 centimètres cubes de cette eau, on prend le degré. Soit 17° ce degré permanent.

Enfin, pour avoir *d*, on opère ainsi : A 50 centimètres cubes de l'eau bouillie filtrée précédente, on ajoute 2 centimètres cubes de solution d'oxalate d'ammonium. La chaux qui a pu rester après l'ébullition est ainsi complètement précipitée. Après repos, on filtre et sur 40 centimètres cubes on détermine encore le degré, par exemple 9°.

Au degré permanent 17, on retranche 3°, en raison de la précipitation incomplète du carbonate de calcium. On a un degré permanent réduit représenté par 14.

On doit interpréter ainsi les résultats trouvés :

a) Le degré total 27 représente la somme des actions exercées sur le savon par l'acide carbonique, le carbonate de calcium, les autres sels de calcium et les sels de magnésium.

b) Le degré 13 est égal à la somme des actions exercées par les sels de magnésium et l'acide carbonique qui restent dans l'eau après élimination de la chaux. Par suite, la différence 27 — 13 = 14° correspond aux sels de calcium.

c) Le degré permanent réduit 14 mesure la somme des actions exercées par les sels de magnésium et les sels de calcium autres que le carbonate. En conséquence, 27 — 14 = 13° correspond au carbonate de calcium et à l'acide carbonique.

d) Le degré 9 représente l'action exercée par les sels de magnésium contenus dans l'eau et non précipités par l'oxalate d'ammonium.

Les sels de calcium et de magnésium correspondant respectivement à 14° et à 9°, soit au total à 23°; il en résulte que, sur les 27° de l'eau à l'état naturel, il en reste 4 dus à l'acide carbonique.

Le carbonate de calcium et l'acide carbonique équivalant ensemble à 13°, le carbonate de calcium équivaut seul à 13° — 4° = 9°.

Connaissant le degré 9 dû au carbonate de calcium, il suffit de le retrancher de 14°, représentant la somme des effets du carbonate de calcium et des sels de calcium autres que le carbonate, pour obtenir 14° — 9° = 5° qui correspond à ces derniers sels.

On a donc pour l'eau examinée :

L'acide carbonique.....	correspondant à	4°
Le carbonate de calcium.....	—	à 9°
Les autres sels de calcium ..	—	à 5°
Les sels de magnésium.....	—	à 9°

Le tableau suivant permet la transformation de ces degrés en poids pour les sels et en volume pour l'acide carbonique. Pour cela, on multiplie le nombre de degrés trouvé par le chiffre correspondant à 1 degré hydrotimétrique du corps :

DANS UN LITRE D'EAU UN DEGRÉ HYDROTIMETRIQUE CORRESPOND A			
Chaux.....	0gr,0057	Sulfate de magnésium	0gr,0125
Chlorure de calcium.....	0 ,0114	Chlorure de sodium.....	0 ,0120
Carbonate de calcium.....	0 ,0103	Sulfate de sodium.....	0 ,0146
Sulfate de calcium	0 ,0140	Anhydride sulfurique.....	0 ,0082
Magnésie.....	0 ,0042	Chlore.....	0 ,0075
Chlorure de magnésium....	0 ,0090	Savon à 50 0/0 d'eau.....	0 ,1061
Carbonate de magnésium...	0 ,0088	Acide carbonique gazeux...	0 ,0050

Ainsi, d'après l'essai ci-dessus donné comme exemple, et en admettant que le calcium soit à l'état de carbonate et de sulfate, et le magnésium à l'état de sulfate, il est facile de se rendre compte que l'eau renferme par litre :

	Acide carbonique....	4° × 0,005	= 0l,020
Sels terreux	carbonate de calcium...	9 × 0,0103	= 0gr,093
	sulfate de calcium	5 × 0,0140	= 0 ,070
	sulfate de magnésium..	9 × 0,0125	= 0 ,110
	Total des sels terreux.....		0gr,273

On voit que le nombre trouvé pour le degré hydrotimétrique d'une eau exprime sensiblement la quantité en centigrammes de sels terreux contenus dans 1 litre de cette eau (27° pour 27cgr,3).

Procédé de MM. Pignet et Hue. -- Ce procédé consiste à faire dissoudre des comprimés dosés dans une quantité déter-

minée de l'eau à essayer, et à examiner ensuite, soit la coloration produite, soit l'apparition d'un phénomène chimique.

Voici quels sont les dosages que cette méthode permet d'effectuer :

1° *Recherche et dosage des nitrites.* — On met un comprimé d'iodure dans 100 centimètres cubes d'eau à analyser. Lorsque la dissolution est complète, on ajoute un comprimé acide que l'on écrase pour le faire dissoudre plus facilement.

Deux cas se présentent :

Le liquide reste incolore, même après cinq minutes d'attente : on en conclut que l'eau ne contient pas de nitrites.

Le liquide devient bleu : c'est que l'eau contient des nitrites. La rapidité d'apparition et l'intensité de la coloration indiquent une proportion plus ou moins grande de ces sels. Si la teinte bleue apparaît aussitôt et devient foncée en deux minutes, c'est que l'eau contient 2 milligrammes de nitrites par litre. Si cette forte intensité n'apparaît qu'au bout de cinq minutes, c'est qu'il n'y en a que 1 milligramme.

2° *Recherche et dosage des nitrates.* — Si, après avoir opéré de la façon qui vient d'être décrite, il ne s'est produit aucune coloration après cinq minutes d'observation, on ajoute cette fois à la solution un comprimé de zinc qu'on écrase avec un agitateur.

On se trouve encore en présence de l'un des deux cas suivants :

L'eau reste incolore, même après cinq minutes d'attente : c'est qu'il n'y a pas de nitrates.

L'eau devient bleue : c'est l'indice de la présence des nitrates. Dans ce dernier cas, si la teinte apparaît immédiatement pour devenir foncée au bout d'une minute, on en conclut qu'il y a environ 100 milligrammes de nitrates par litre. Si la teinte bleue apparaît au bout d'une à deux minutes pour devenir prononcée après cinq minutes, il y a environ 50 milligrammes de nitrates par litre. Enfin, si cette même teinte apparaît au bout de quatre à cinq minutes, l'eau contient environ 15 milligrammes de nitrates par litre.

3° *Recherche et dosage de l'ammoniaque libre et de l'ammoniaque albuminoïde.* — Dans 50 centimètres cubes de l'eau à essayer, on verse 2 centimètres cubes du réactif de Nessler. S'il y a de l'ammoniaque en quantité suffisante, on a une coloration jaune plus ou moins foncée.

Le dosage se fait en appliquant le principe du procédé de Wanklyn, qui consiste à comparer la coloration obtenue par le réactif de Nessler dans l'eau à analyser avec la coloration produite par ce même réactif dans des dissolutions de sel ammoniac renfermant des quantités connues de ce sel. Mais ici les colorations liquides sont remplacées par une gamme de couleurs que l'on trouve dans le commerce, et spécialement préparées pour cet usage.

On opère ainsi : On fait dissoudre un comprimé alcalin dans un ballon contenant 50 centimètres cubes de l'eau. Ce ballon communique avec un tube à essai gradué à 10 centimètres cubes, placé dans un récipient à large ouverture rempli d'eau froide. On chauffe l'eau de manière à en provoquer la distillation. Lorsqu'on a obtenu 10 centimètres cubes de liquide distillé, on enlève le tube à essai et on continue encore l'ébullition pour éliminer les dernières traces d'ammoniaque libre. On laisse refroidir, puis on ajoute à l'eau du ballon 1/2 centimètre cube de solution alcaline de permanganate de potassium. On remonte l'appareil et on recommence une nouvelle distillation. On recueille encore le liquide, d'abord dans un premier tube à essai de façon à obtenir 10 centimètres cubes, puis dans un second tube à essai en s'arrêtant aussi à 10 centimètres cubes.

Le premier tube contient les 3/4 de l'ammoniaque libre renfermée dans l'eau. Les deuxième et troisième tubes contiennent l'ammoniaque albuminoïde.

Le contenu de chacun de ces trois tubes est versé dans des capsules de porcelaine dans lesquelles on ajoute 1/2 centimètre cube de réactif de Nessler. Il se forme des colorations jaunes plus ou moins intenses que l'on compare avec la gamme colorée, ce qui permet de déterminer, sans calcul, les quantités d'ammoniaque libre et albuminoïde contenues dans 1 litre de l'eau expérimentée.

4° *Recherche et dosage des chlorures.* — Dans 100 centimètres cubes d'eau, on fait dissoudre un comprimé de chromate. On ajoute successivement un, deux, trois, ... comprimés d'azotate d'argent jusqu'à l'apparition d'une coloration rouge. Le nombre de comprimés nécessaires multiplié par 10 milligrammes représente la quantité de chlore contenue dans 1 litre d'eau.

5° *Dosage des matières organiques.* — Dans 100 centimètres cubes d'eau, on laisse tomber un comprimé acide, on porte cette eau à l'ébullition, puis on ajoute un nouveau comprimé de permanganate de potassium. On continue l'ébullition, le comprimé se dissout rapidement. Si la coloration rose tout d'abord produite disparaît, on ajoute un nouveau comprimé de permanganate, et ainsi de suite jusqu'à persistance du phénomène. La quantité de matières organiques correspond à $1^{mgr},5$-2 milligrammes par comprimé.

6° *Détermination du degré hydrotimétrique.* — On met 40 centimètres cubes d'eau dans un flacon hydrotimétrique, on ajoute un comprimé de savon que l'on écrase avec une baguette en verre, puis on agite fortement. On continue l'addition de comprimés jusqu'à formation d'une mousse persistant cinq minutes. Chaque comprimé correspondant à 4° hydrotimétriques, il est ainsi facile de connaître le degré total. De ce nombre, il convient de retrancher 1° représentant la quantité de savon nécessaire pour produire la mousse avec l'eau distillée.

Si le premier comprimé produit la mousse avant sa dissolution complète, on évalue, au jugé, la fraction utilisée.

7° *Recherche du plomb, du fer, du cuivre et du zinc.* — Une eau contient du plomb si l'addition d'un comprimé de chromate donne lieu à un précipité.

Pour la recherche du fer, du cuivre et du zinc, on prend 100 centimètres cubes d'eau; on y dissout un comprimé acide. On ajoute un comprimé de ferrocyanure.

S'il se produit une coloration bleue, c'est que l'eau contient du fer;

Une coloration rouge, l'eau contient du cuivre;

Un précipité blanc, l'eau contient du zinc.

La coloration est d'autant plus intense ou le précipité d'autant plus important qu'il existe une plus grande quantité de corps en dissolution.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Résidu total. — On attachait autrefois une assez grande importance à la teneur en résidu total. Actuellement, sans considérer ce dosage comme inutile, on lui attribue plutôt un rôle de valeur secondaire. Il est certain qu'une eau contenant une forte proportion de carbonates calcaire et magnésien peut avoir une influence beaucoup moins fâcheuse qu'une eau renfermant une faible proportion de matières minérales provenant d'une pollution, et cependant dans ce dernier cas le résidu est moins important que dans le premier.

TABLEAU I

RÉSIDU TOTAL PAR LITRE D'EAU

Eau du Rhin (à Bâle)	0gr,109
— de la Moselle	0 ,116
— de la Loire (à Orléans)	0 ,134
— de la Garonne (à Toulouse)	0 ,137
— du Rhône (à Lyon)	0 ,184
— de la Seine (en amont de Paris)	0 ,254
— de la Tamise (à Londres)	0 ,408
— d'Arcueil	0 ,466
— des puits de Paris	1 ,540
— de l'océan Atlantique	38 ,340

En général, le résidu total par litre d'une eau potable varie de 0gr,130 à 0gr,500.

Ammoniaque. — L'ammoniaque libre ne doit pas se trouver en proportion supérieure à 1 milligramme par litre d'eau. Au delà de cette quantité et en présence d'un excès de chlorures, tout laisse supposer qu'il y a infection due aux matières organiques végétales. Quelquefois certains métaux peuvent réduire les nitrates en donnant de l'ammoniaque.

Quant à l'ammoniaque albuminoïde, sa présence est dangereuse quand le dosage décèle une quantité de cette base supérieure à un dixième de milligramme. La coexistence de chlorures, d'ammoniaque albuminoïde et de nitrates met en évidence la contamination d'une eau par des matières animales. Si la proportion de chlorures est faible ou nulle, il y a tout lieu de croire que la pollution provient de matières végétales. Enfin une augmentation subite de la quantité de chlorures dans une même eau est l'indice certain que cette eau est infectée.

Chlorures. — Ce sont, en général, des chlorures alcalins ou alcalino-terreux. Une eau dont la proportion de chlore est supérieure à 100 milligrammes par litre laisse supposer une pollution due à des infiltrations d'eaux ménagères, d'eaux d'égouts, de liquides provenant de fosses d'aisances, etc., très chargées en chlorures.

Nitrates. — Ils proviennent de l'oxydation des matières organiques d'origine animale. Ils peuvent être le résultat de la pollution des eaux d'égouts, des engrais, etc. Une quantité très faible n'a pas grande importance; mais, au delà de 30 milligrammes, l'eau devient impropre à tout usage alimentaire.

Nitrites. — Les nitrites indiquent presque toujours la présence de matières organiques en voie de transformation. Ces composés s'observent dans le cas d'oxydation incomplète de substances azotées dans un sol insuffisamment aéré ou encore par suite de la réduction des nitrates par les microorganismes. Plus spécialement le contact de certains métaux, fer ou plomb des canalisations, donne lieu quelque-

fois à la transformation des nitrates en nitrites. Dans le premier cas, la constatation des nitrites suffit à faire rejeter les eaux dans lesquelles leur présence est décelée. Toutefois, il convient de faire exception pour les eaux pluviales, qui en contiennent très souvent.

Oxygène. — L'expérience montre que les eaux chargées de matières organiques renferment très peu d'oxygène en dissolution. Les eaux potables renferment 8 à 10 centimètres cubes d'oxygène par litre.

TABLEAU II

OXYGÈNE CONTENU DANS UN LITRE D'EAU DE SEINE

Eau du barrage d'Ivry	9cc,05
— du pont de la Tournelle	8 ,05
— du viaduc d'Auteuil	5 ,99
— du pont d'Asnières	5 ,34
— à Bezons	1 ,34
— à Marly	1 ,91
— à Poissy	6 ,10
— à Meulan	8 ,10
— à Mantes	9 ,96

Acide carbonique. — Il est favorable à la digestion. Aussi une quantité relativement faible de ce gaz n'a-t-elle aucun inconvénient pour la santé.

Matières organiques. — Les matières organiques sont de deux sortes : les unes d'origine animale, très nocives, même lorsqu'elles existent en faible quantité ; les autres d'origine végétale, pouvant être contenues en proportion plus élevée sans grand dommage pour la santé.

Une eau analysée par le procédé Albert Lévy et consommant par litre plus de 2 à 3 milligrammes d'oxygène doit être absolument rejetée pour les usages alimentaires (Pouchet).

Voici la composition moyenne par litre de l'eau de Seine puisée en amont de Paris :

Résidu total	0,2544
Oxygène (cc.)	7,9000
Azote (cc.)	12,0000
Anhydride carbonique libre (c.c.)	16,2000
Calcium	0,0739
Magnésium	0,0048
Sodium	0,0074
Potassium	0,0022
Alumine	0,0003
Oxyde ferrique	0,0017
Anhydride sulfurique	0,0219
Acide carbonique combiné	0,1018
Chlore	0,0074
Silice	0,0244

Le Comité consultatif d'hygiène a fixé les limites de potabilité des eaux, et a classé celles-ci en quatre catégories : eau très pure, eau potable, eau suspecte, eau mauvaise.

Le tableau de la page 572, publié par ce Comité, est celui auquel on se reporte dans la plupart des cas.

Dans les analyses, quelques chimistes présentent la composition d'une eau sous la forme de groupements hypothétique. Voici comment ils opèrent :

Le chlore est combiné au sodium. On attribue le restant, s'il y en a, au calcium. S'il y a, au contraire, excès de soude, on unit celle-ci à l'anhydride sulfurique.

Dans le cas où l'anhydride sulfurique est en quantité prépondérante, on le combine à la chaux.

L'acide azotique est mis avec la chaux.

On laisse la silice libre, et le reste de la chaux et de la magnésie se groupe avec l'anhydride carbonique pour former des carbonates neutres ou des bicarbonates.

Cette règle n'a cependant rien d'absolu. Un essai qualitatif a pu démontrer la nécessité d'effectuer des groupements différents. C'est pourquoi il paraît préférable de présenter les résultats sous la forme d'analyse élémentaire.

	EAU			
	TRÈS PURE	POTABLE	SUSPECTE	MAUVAISE
Chlore.....	moins de 0s,015 par litre	moins de 0s,040 (excepté au bord de la mer)	0s,050 à 0s,100	plus de 0s,100
Acide sulfurique.....	0,002 à 0,005	0,005 à 0,030	plus de 0,030	plus de 0,050
Oxygène emprunté au permanganate en solution alcaline.....	moins de 0,001	moins de 0,002	de 0,003 à 0,004	plus de 0,005
Degré hydrotimétrique total.	5° à 15°	15° à 30°	au-dessus de 30°	au-dessus de 40°
Degré hydrotimétrique persistant après l'ébullition.	2° à 5°	5° à 12°	12° à 18°	au-dessus de 20°

Indépendamment des eaux potables, qui intéressent surtout le consommateur, il en est d'autres qui, comme les eaux résiduaires, donnent naissance à de graves contestations entre particuliers et industriels. Dans le cas d'eaux résiduaires, le chimiste est appelé à se prononcer sur la nature et l'importance des déjections ou des produits de déversement dans les cours d'eau. En outre des matières généralement dosées dans les eaux potables, il faut se préoccuper de produits très divers variables suivant l'industrie incriminée. Les éléments principaux qu'il faut déterminer sont : les chlorures, les phosphates, les matières organiques, les nitrites, les nitrates, l'ammoniaque libre et albuminoïde, l'hydrogène sulfuré, l'oxygène dissous et des éléments divers tels que les métaux usuels (plomb, cuivre, zinc, fer), des acides, des infiltrations de pétrole et d'huile minérale, des liquides provenant de la fabrication du gaz d'éclairage ou de la non-étanchéité de fosses d'aisances, etc.

Voici, à titre d'indication, des exemples d'analyses d'eaux :

ÉLÉMENTS DOSÉS	EAUX				
	D'ANOR	DE LA VESLE	D'HYÈRES	DE TARBES	DE VALENCE
Degré hydrotimétrique total	5°	23°,5	25°,5	18°	15°
Résidu d'évaporation par litre :					
Anhydride sulfurique	0,005	0,021	0,056	0,014	0,002
Chlore	0,004	0,011	0,208	0,003	0,001
Silice	»	0,013	0,014	0,011	0,004
Alumine et oxyde ferrique	0,002	0,001	traces	traces	traces
Chaux	0,013	0,139	0,135	0,105	0,083
Magnésie	0,003	0,021	0,038	0,010	0,002
Anhydride azotique	traces	0,014	0,001	0,001	0,001
Anhydride carbonique	»	»	0,066	0,086	0,066
Produits volatils et combustibles	0,010	0,008	0,005	0,004	0,003
Matières non dosées et pertes (sans déduction de l'oxygène correspondant au soufre)	0,018	0,122	0,069	0,003	0,002
Total du résidu d'évaporation.	0,055	0,350	0,592	0,237	0,164
Évaluation des matières organiques :					
Le poids d'oxygène cédé aux matières organiques par une solution titrée de permanganate de potassium est, par litre, de	non dosé	non dosé	0,0002	0,0003	0,0005
La quantité d'acide oxalique susceptible d'absorber pour sa combustion le poids d'oxygène trouvé est de	non dosé	non dosé	0,0022	0,028	0,0039

EXAMEN MICROSCOPIQUE ET ANALYSE BACTÉRIOLOGIQUE

Dans des cas douteux, l'examen microscopique et l'analyse bactériologique peuvent être très utiles. Mais jusqu'ici les renseignements fournis par ces deux procédés d'investigation n'ont pas donné de renseignements aussi positifs que ceux fournis par l'analyse chimique.

Gérardin classe les eaux en quatre catégories définies d'après la nature et l'organisation des animaux que l'on y rencontre.

1re *catégorie*. — Eaux excellentes.

ANIMAUX	PLANTES
Poissons.	Ranunculus sceleratus.
Crevettes.	Iris fœtida.
Sangsues.	Juncus compressus.
Larves de libellules.	Polygonum amphibium.
Physa fontinalis.	Zanichellia palustris.
Unio pictorum.	Myriophyllium spicatum.
Nérites.	Carex riparia.
Lymnées, etc.	Sparganium simplex, etc.

2e *catégorie*. — Eaux de bonne qualité.

ANIMAUX	PLANTES
Larves d'éphémères (vers rouges).	Epis d'eau.
Dytiques.	Véroniques.
Valvata piscinalis, etc.	Phragmites communis.

3e *catégorie*. — Eaux médiocres.

ANIMAUX	PLANTES
Lymnea ovata.	Roseaux.
Lymnea stagnalis.	Patiences.
Planorbis submarginatus.	Ciguës.
Planorbis complanatus.	Menthes.
Sangsues noires.	Joncs.
Cycles cornea, etc.	Nénuphars, etc.

4e *catégorie*. — Eaux infectes.

ANIMAUX	PLANTES D'ORDRE INFÉRIEUR
Néant.	Arundo, pyragmites.

Cet examen microscopique nécessite, comme on le voit, une étude spéciale des espèces animales et végétales.

Il en est de même de l'analyse bactériologique.

Certains hygiénistes classent les eaux d'après le nombre de bactéries contenues dans 1 centimètre cube.

Voici l'échelle établie par M. Miquel :

Eau excessivement pure...	0 à	10	bactéries par cm³.
— très pure.....	10 à	100	—
— pure.....	100 à	1.000	—
— médiocre.....	1.000 à	10.000	—
— impure.....	10.000 à	100.000	—
— très impure.....	100.000 et au delà		—

D'autre part, M. Macé considère une eau comme médiocre lorsqu'elle renferme de 200 à 500 bactéries par centimètre cube et très mauvaise lorsqu'elle en contient de 1.000 à 10.000.

Dans ces diverses interprétations, il ne s'agit, bien entendu, que des espèces banales.

Or, dans la numération ordinaire, on ne fait aucune différence entre les espèces saprophytes et les espèces pathogènes. La détermination du bacterium coli et du bacille d'Eberth, qu'il serait intéressant de connaître, nécessite des recherches délicates et attentives.

A la vérité, la simple numération des colonies bactériennes ne suffit pas à faire connaître la pureté d'une eau. Il faudrait pouvoir déterminer facilement et d'une façon certaine les microorganismes pathogènes, et sous ce rapport l'étude n'est pas encore terminée. Des recherches de ce genre ne peuvent être faites que par des spécialistes disposant du matériel nécessaire. L'examen microscopique des parasites vivants réclame également une étude spéciale. Pour ces raisons on renverra le lecteur aux ouvrages spéciaux traitant de ces matières.

Il serait toutefois injuste de nier l'utilité des examens microscopiques et bactériologiques des eaux. Tant de savants se sont adonnés et s'adonnent encore avec ardeur et persévérance à l'étude de la bactériologie, qu'il faut espérer

que leurs efforts seront couronnés de succès. Mais, sous le rapport de l'appréciation et du contrôle de la qualité des eaux en général, il faut reconnaître qu'en l'état actuel, c'est encore la chimie qui, par la précision de ses méthodes, donne les renseignements les plus pratiques et les plus concluants.

APPENDICE

DÉCRET DU 3 JUIN 1902

Fixant les tarifs de perception des essais et analyses faits aux laboratoires de l'École des Ponts et Chaussées

Le Président de la République Française,

Sur le rapport du Ministre des Travaux publics et du Ministre des Finances,

Vu l'article 32 de la loi de finances du 30 mars 1902, portant fixation du budget général des dépenses et des recettes de l'exercice 1902, ledit article ainsi conçu :

« Est autorisée, à partir de la promulgation de la présente loi, la perception au profit du Trésor des frais d'essais et d'analyses effectués par le laboratoire d'essais physiques, chimiques et mécaniques de l'École nationale des Ponts et Chaussées.

« Les tarifs de perception seront fixés par un décret rendu sur la proposition du Ministre des Travaux publics et du Ministre des Finances » ;

Vu le décret du 31 mai 1862 sur la comptabilité publique,

Décrète :

Article premier. — A partir du jour de l'insertion du présent décret au *Journal officiel*, les essais et analyses effectués par le laboratoire d'essais physiques, chimiques et mécaniques de l'École nationale des Ponts et Chaussées donneront lieu à la perception de taxes déterminées par le tarif ci-annexé.

Art. 2. — Les recettes seront effectuées par les receveurs de l'enregistrement au titre « Produits du domaine autres que le domaine forestier — Redevances pour frais d'analyses et d'essais dans les laboratoires de l'État. »

Le directeur du laboratoire délivrera les titres de perception qui seront extraits d'un livre à souche.

Les frais d'envoi d'échantillons sont à la charge des demandeurs.

Il ne sera procédé, par le directeur du laboratoire, aux essais et analyses, qu'autant que les demandeurs lui présenteront le récépissé du versement effectué à la caisse des receveurs de l'enregistrement et dont le numéro, la date et le montant seront reportés au talon du livre à souche des titres de perception.

ART. 3. — Seront exempts de taxe les essais et analyses demandés soit par les commissions du Ministère des Travaux publics, soit par les fonctionnaires relevant directement de ce ministère et ayant pour objet : 1° des réceptions de matériaux ; 2° des études effectuées dans l'intérêt des services dépendant du ministère ; 3° des recherches purement scientifiques.

ART. 4. — Le Ministre des Travaux publics et le Ministre des Finances sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent décret, qui sera inséré au *Journal officiel* et au *Bulletin des Lois*.

ÉMILE LOUBET.

Le Ministre des Travaux publics,
PIERRE BAUDIN.

Le Ministre des Finances,
J. CAILLAUX.

TARIF DES ESSAIS ET ANALYSES

EFFECTUÉS PAR LES LABORATOIRES D'ESSAIS PHYSIQUES, MÉCANIQUES ET CHIMIQUES DE L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES.

TABLEAU A. — *Pierres naturelles et artificielles. Matériaux pour couverture.* (*Confection des éprouvettes d'essai.*)

N° D'ORDRE	DÉSIGNATION	LA PIÈCE	OBSERVATIONS
		francs	
	1° Quartzites, granites très durs, porphyres très durs, grès arkoses et autres roches analogues :		
1	Cube de 4 centimètres d'arête...	4 »	Par série de 4 éprouvettes au moins, préparées ensemble.
2	Cube de 5 centimètres d'arête...	6 »	
3	Cube de 6 centimètres d'arête ..	8 »	
4	Cube de 7 centimètres d'arête....	11 »	
5	Prisme de 6 × 4 × 12 pour usure.	12 »	Par série de 2 éprouvettes au moins, préparées ensemble.
	2° Granites et porphyres ordinaires, grès durs :		
6	Cube de 4 centimètres d'arête...	3 »	Par série de 4 éprouvettes au moins, préparées ensemble.
7	Cube de 5 centimètres d'arête....	4 »	
8	Cube de 6 centimètres d'arête...	5 »	
9	Cube de 7 centimètres d'arête....	6 »	
10	Prisme pour essai d'usure.....	7 »	Par série de 2 éprouvettes au moins, préparées ensemble.
	3° Calcaires durs :		
11	Cube de 4 centimètres d'arête....	2 »	Par série de 4 éprouvettes au moins, préparées ensemble.
12	Cube de 5 centimètres d'arête...	2 50	
13	Cube de 6 centimètres d'arête...	3 25	
14	Cube de 7 centimètres d'arête...	4 »	
15	Prisme d'usure.....	5 »	Par série de 2 éprouvettes au moins, préparées ensemble.
	4° Calcaires moyennement durs, grès tendres :		
16	Cube de 7 centimètres d'arête...	2 »	Par série de 4 éprouvettes au moins, préparées ensemble.
	5° Calcaires tendres :		
17	Cube de 7 centimètres d'arête...	1 »	
	6° Complément de préparation, à la machine ou par égrisage à la main, d'éprouvettes adressées façonnées.		

TABLEAU A (*suite*)

N^os D'ORDRE	DÉSIGNATION	LA PIÈCE	OBSERVATIONS
		francs	
18	Eprouvettes de la 1re catégorie	1 50	Cubes de 4 à 5 centimètres d'arête.
19	(quartzites, etc.).....	2 50	Cubes de 6 à 7 centimètres d'arête.
20	Eprouvettes de la 2e catégorie...	1 50	
21	Eprouvettes de la 3e catégorie...	1 »	
22	Eprouvettes de la 4e catégorie...	» 75	
23	Eprouvettes de la 5e catégorie...	» 50	
24	7e Sciage de briques et préparation d'éprouvettes pour essais de compression.....	1 20	
25	8e Préparation de tuiles ou briques pour essais de flexion.....	» 75	Par série de 3 éprouvettes au moins, préparées ensemble.
26	9e Ardoises : découpage d'éprouvettes normales pour essais de flexion....	» 50	
27	Les prix à appliquer pour la préparation des éprouvettes pour essais de flexion, de cisaillement, de traction, etc., sur les pierres naturelles et artificielles, seront établis en prenant pour base les prix portés plus haut pour la préparation des cubes.		
	Pour les apprêts nécessaires exécutés au laboratoire et qui ne sont pas prévus au présent tarif, on comptera :		
28	Par heure de travail à la main.....	1 »	
29	Par heure de travail à la machine...	2 »	

TABLEAU B. — *Pierres naturelles et artificielles. Matériaux pour couverture. (Essais divers.)*

N°s D'ORDRE	DÉSIGNATION	PRIX
		francs
1	Propriétés générales. Description de la pierre...	5 »
2	Détermination de la densité apparente après dessiccation.....	2 50
3	Détermination du poids spécifique.....	2 50
4	Détermination de la densité apparente après imbibition.....	2 50
5	Détermination de la porosité.....	2 »
6	Détermination de la perméabilité à l'eau.....	2 50
7	Détermination de l'hygroscopicité.....	2 50
	Détermination de la résistance :	
8	A la compression après dessiccation ou après imbibition d'eau.....	5 »
9	A la gélivité à un ou plusieurs degrés différents d'imbibition, par l'aspect des déformations physiques apparentes (éprouvettes soumises à l'action de 25 gels et dégels successifs).....	20 »
10	A la compression après essai de gélivité comme ci-dessus.....	25 »
11	A la traction, sous chaque état (après dessiccation ou imbibition).....	5 »
12	A la flexion, sous chaque état (après dessiccation ou imbibition).....	5 »
13	Au cisaillement, sous chaque état (après dessiccation ou imbibition).....	5 »
14	Au choc, sous chaque état (après dessiccation ou imbibition).....	5 »
15	A l'usure, sous chaque état (après dessiccation ou imbibition).....	5 »
16	Détermination de la facilité de polissage.....	5 »
17	Détermination de la résistance à l'action du feu.	10 »
18	Détermination de la résistance à l'action du feu et essai de compression à la suite	12 50
19	Détermination de la résistance à l'usure des matériaux d'empierrement (pierre cassée).....	7 50
20	Détermination du coefficient d'élasticité à la compression sur prismes de 100 centimètres carrés de section au maximum	7 50
21	Détermination du coefficient d'élasticité à la flexion.....	7 50
	Recherches spéciales aux pierres artificielles et matériaux pour couverture :	
22	Détermination de la structure et de l'homogénéité.....	1 »
23	Détermination du degré de dureté.....	2 50

TABLEAU B (*suite*)

N°s D'ORDRE	DÉSIGNATION	PRIX
		francs
24	Détermination de la proportion de sels solubles.	2 50
25	Détermination de la proportion d'expansifs.....	2 50
26	Essai de résistance à la pression intérieure pour les tuyaux.....	10 »
27	Essai à l'acide sulfureux pour les ardoises.....	5 »
	Analyse chimique.....	Pour mémoire

NOTA. — Les différents essais ou déterminations indiqués ci-dessus sont faits, sauf pour l'usure, le polissage la pierre cassée et les coefficients d'élasticité, sur des séries d'éprouvettes de 3 au minimum et de 6 au maximum; les prix spécifiés sont applicables encore lorsque le nombre d'éprouvettes à essayer est moindre que le minimum.

TABLEAU C. — *Chaux hydrauliques et ciments.*

N°s D'ORDRE	DÉSIGNATION	PRIX
		francs
	Analyses et autres recherches chimiques.....	(*a*)
1	Nature du produit. Poids spécifique. Perte au rouge.....	3 50
2	Densité apparente sur produit tel quel.....	1 »
3	Densité apparente après tamisage au tamis de 4.900 mailles.....	2 50
4	Finesse de mouture ou de blutage.....	1 »
5	Détermination de l'homogénéité par l'iodure de méthylène.....	8 »
6	Détermination de l'homogénéité par l'examen à la loupe.....	1 50
7	Détermination des matières ajoutées.....	10 »
8	Détermination de la proportion d'eau de gâchage.	1 »
9	Rendement en pâte pure ou en mortier d'un dosage donné.....	1 »
10	Prise (début et fin) à l'air et à l'eau douce ou à l'eau de mer artificielle.....	2 50
11	Élévation de température pendant la prise.....	1 »
12	Invariabilité de volume à froid.....	1 »
13	Invariabilité de volume à chaud (expansifs).....	2 50
14	Résistance à la traction et à la compression sur	

(*a*) Voir le tableau spécial.

TABLEAU C (*suite*)

N°s D'ORDRE	DÉSIGNATION	PRIX
		francs
	briquettes en 8 de 5 centimètres carrés de section, après durcissement à l'air, sous l'eau douce ou l'eau de mer artificielle (6 briquettes par essai fait soit avec pâte pure, soit avec mortier battu et plastique de sable normal, soit encore avec mortier plastique de sable ordinaire), par période et par nature de mortier.	1 50
15	Résistance à la flexion et à la compression sur prismes de 2 × 2 × 12 après durcissement à l'air, sous l'eau douce ou l'eau de mer artificielle (6 prismes par essai fait soit avec pâte pure, soit avec mortier battu et plastique au sable normal ou au sable ordinaire), par période et par nature de mortier.....	1 50
16	Résistance à la compression sur cubes de 7 × 7 après durcissement à l'air ou sous l'eau pour comparaison avec essais des pierres (6 cubes par essai, soit avec pâte pure, soit avec mortier), par période d'essai et par nature de mortier..	5 »
17	Résistance à la traction, à la flexion et à la compression sur briquettes en 8 ou prismes après durcissement dans l'eau chaude jusqu'à une semaine, au maximum.....	12 »
18	Détermination des changements de longueur sur baguettes prismatiques de 80 centimètres de longueur, conservées à l'air ou dans l'eau douce ou salée (2 éprouvettes au moins en pâte pure ou en mortier mesurées à différentes périodes jusqu'à deux ans et au delà).....	10 »
19	Essais d'adhérence (6 éprouvettes pour chaque période), par période.....	3 »
20	Détermination de la porosité d'un mortier avec sable donnée, après durcissement à l'air ou dans l'eau (par période et par dosage).....	5 »
21	Détermination de la perméabilité sur cubes de 7 × 7 (par période et par dosage).....	5 »
22	Essais de résistance à la gelée par l'aspect des déformations physiques apparentes sur cubes de 7 × 7 (6 éprouvettes par dosage soumises à l'action de 25 gels et dégels successifs), par période.....	20 »
23	Essais à la gelée comme ci-dessus, puis essai à la compression à la suite (12 éprouvettes par dosage).....	25 »
24	Essais de décomposition par l'eau de mer artificielle sur cubes normaux, par filtration.....	10 »

TABLEAU C (*suite*)

Nos D'ORDRE	DÉSIGNATION	PRIX
		francs
25	Essai du produit comme béton. — Détermination de la résistance à la compression sur cubes de 20 centimètres d'arête au maximum, de la résistance à la traction ou encore de la résistance à la flexion sous moment constant, sur éprouvettes de 100 centimètres carrés de section au minimum. Pour chaque éprouvette.....	5 »
	Détermination des coefficients d'élasticité :	
26	A la traction sur éprouvettes de 1 mètre de longueur utile. Pour chaque éprouvette.....	7 50
27	A la compression sur prismes de 200 centimètres carrés de section au maximum. Pour chaque éprouvette.....	7 50
28	Détermination de la résistance à la traction ou à la compression sur des éprouvettes normales confectionnées en dehors du laboratoire. Par pièce.....	» 15

NOTA. — Les prix portés pour les essais ci-contre comprennent la fourniture du sable et les frais de préparation des éprouvettes. Ces prix s'appliquent également aux trass et pouzzolanes et aux plâtres.

TABLEAU D. — *Sables.*

Nos D'ORDRE	DESIGNATION	PRIX
		francs
1	Détermination de la composition granulométrique.....	2 50
2	Détermination de la composition micrographique.....	3 »
3	Détermination de la densité apparente après dessiccation.....	2 50
4	Détermination du dosage pour une résistance donnée à la compression.....	10 »
5	Détermination du prix de revient d'un mortier au mètre cube pour un dosage et des matières donnés.....	5 »
6	Détermination de la résistance à la traction ou à la compression pour un dosage donné.....	Comme pour les chaux et ciments.

TABLEAU E. — *Bois de construction ou de pavage.* (*Essais divers.*)

Nos D'ORDRE	DÉSIGNATION	PRIX
		francs
1	Propriétés générales. Description, disposition des veines, nœuds, etc.....	5 »
2	Détermination de la densité apparente, au moment de la livraison et au moment de l'essai après dessiccation ou après imbibition.....	10 »
3	Détermination du degré d'humidité du bois au moment de la livraison ou après immersion plus ou moins prolongée.....	10 »
4	Détermination de la dilatation linéaire ou de la contraction, par imbibition ou par dessiccation.	10 »
5	Détermination de la résistance à la traction à un état quelconque : dessiccation, imbibition, etc.	5 »
6	Détermination de la résistance à la compression à un état quelconque : dessiccation, imbibition, etc.....	5 »
7	Détermination de la résistance au cisaillement à un état quelconque : dessiccation, imbibition, etc.....	5 »
8	Détermination de la résistance à la flexion à un état quelconque : dessiccation, imbibition, etc.	5 »
9	Détermination des coefficients d'élasticité à un état quelconque : dessiccation, imbibition, etc.	7 50
10	Détermination de la résistance au choc à un état quelconque : dessiccation, imbibition, etc....	5 »
11	Détermination de la résistance à l'usure à un état quelconque : dessiccation imbibition, etc.	5 »
12	Mesure de l'effort de poussée développé par l'imbibition quand la dilatation est empêchée.....	20 »

NOTA. — Les différentes déterminations ou essais indiqués ci-dessus sont faits, sauf pour l'usure et les coefficients d'élasticité, sur des séries d'éprouvettes de trois au minimum et de six au maximum ; les prix spécifiés sont encore applicables lorsque le nombre d'éprouvettes à essayer est moindre que le minimum.

TABLEAU F. — *Métaux, câbles, cordages et divers.* (*Essais divers.*)

N°s D'ORDRE	DÉSIGNATION	PRIX
		francs
	1° Essai de traction ou de compression sur éprouvettes de forme normale :	
	a. Détermination de la résistance à la traction ou à la compression, mesure de l'allongement ou du raccourcissement.	
1	Pour 1 essai	2 »
2	Pour 2 ou plusieurs essais simultanés, l'un	1 75
3	Pour 10 essais simultanés	12 »
4	Pour 25 essais simultanés	30 »
5	Pour 50 essais simultanés	56 »
6	Pour 100 essais simultanés	100 »
	b. Détermination de la limite pratique d'élasticité, de la résistance à la traction ou à la compression, de la contraction, mesure des allongements et des coefficients du travail.	
7	Pour 1 essai	4 50
8	Pour ou plusieurs essais simultanés, l'un	4 »
9	Pour 10 essais simultanés	30 »
10	Pour 25 essais simultanés	67 50
11	Pour 50 essais simultanés	120 »
12	Pour 100 essais simultanés	225 »
	c. Détermination du coefficient d'élasticité, de la limite réelle et de la limite apparente ou pratique d'élasticité, de la limite des allongements proportionnels, des résistances à la traction ou à la compression, de la contraction, de la mesure des allongements et du travail de déformation.	
13	Pour 1 essai	7 50
14	Pour 2 essais simultanés	13 »
15	Pour 3 essais simultanés	18 50
16	Pour 5 essais simultanés	30 »
17	Pour 10 essais simultanés	45 »
	2° Essai de flexion sur deux appuis de pièces jusqu'à 5 mètres de portée : Détermination de la limite des flèches élastiques, de la résistance à la flexion et de la flèche de rupture.	
18	Pour 1 essai	6 »
19	Pour 2 ou plusieurs essais simultanés, l'un	5 »
20	Pour 10 essais simultanés	40 »
21	Pour 25 essais simultanés	90 »

TABLEAU F (*suite*)

N°s D'ORDRE	DÉSIGNATION	PRIX
		francs
	3° Essais de pliage à froid sur métal naturel, recuit ou trempé (angle de pliage avant criques ou rupture, pliage à bloc).	
22	Pour 1 essai	2 »
23	Pour 2 essais simultanés	3 »
24	Au-dessus de 2 essais, par essai	1 »
	4° Essais de fragilité par choc sur barreaux entaillés (préparation des entailles, essai, mesure du travail et de l'angle de rupture, aspect de la cassure).	
	a. Éprouvettes Charpy :	
25	Pour 1 essai	3 »
26	Pour 2 essais simultanés	4 »
27	Au-dessus de 2 essais, par essai	1 50
	b. Éprouvettes Frémont :	
28	Pour 1 essai	1 50
29	Pour 2 essais simultanés	2 »
30	Au-dessus de 2 essais, par essai	0 75
	c. Préparation complète des éprouvettes Frémont (par série de deux au minimum) dans les extrémités des barreaux Charpy.	
31	L'éprouvette	1 25
	5° Essais de traction sur fils métalliques jusqu'à 8 millimètres de diamètre : résistance à la traction et mesure de l'allongement.	
32	Pour 1 essai	1 »
33	Pour 2 ou plusieurs essais simultanés, l'un	0 75
34	Pour 10 essais	5 »
	6° Essais de torsion sur fils métalliques jusqu'à 8 millimètres de diamètre : moment de torsion, travail de torsion, nombre de rotations, etc.	
35	Pour 1 essai	1 »
36	Pour 2 ou plusieurs essais simultanés, l'un	0 75
37	Pour 10 essais	5 »
	7° Essais de résistance à la traction sur :	
	a. Câbles et cordages ronds :	
	1° En chanvre. — Poids au mètre, charge de rupture, allongement, diamètre.	

TABLEAU F (*suite*)

N°s D'ORDRE	DÉSIGNATION	PRIX
		francs
38	Pour 1 essai	6 »
39	Pour 2 ou plusieurs essais simultanés, l'un.....	5 »
	Poids au mètre, charge de rupture, allongement, diamètre, nombre de fils, nature de la fibre, etc.	
40	Pour 1 essai	10 »
41	Pour 2 ou plusieurs essais simultanés, l'un.....	7 50
	2° En métal. — Poids au mètre, charge de rupture, allongement, nombre de pliages alternatifs des fils.	
42	Pour 1 essai	10 »
43	Pour 2 ou plusieurs essais simultanés, l'un.....	7 50
	Poids au mètre, charge de rupture, allongement, diamètre des fils, qualité des fils aux pliages alternatifs à la torsion, nombre de spires de fils par toron, nombre de spires de toron par mètre, etc.	
44	Pour 1 essai	20 »
45	Pour 2 ou plusieurs essais simultanés, l'un.....	15 »
	b. Chaines :	
	1° Diamètre du métal de la maille au-dessous de 0m,010 ; charge de rupture, allongement...	
46	Par essai	10 »
	2° Diamètre du métal de la maille de 0m,010 et au-dessus, charge de rupture, allongement...	
47	Par essai	15 »
	c. Courroies et câbles plats, charge de rupture, allongement.	
48	Pour 1 essai	6 »
49	Pour 2 ou plusieurs essais simultanés, l'un.....	5 »
	d. Draps, toiles, tissus, bandes de caoutchouc, ficelles, etc.	
	Résistance à la rupture en trame et en chaine, nombre de fils par centimètre carré, poids.	
50	Pour 1 essai	2 50
51	Pour 2 ou plusieurs essais simultanés, l'un.....	2 »
	Les longueurs nécessaires pour 1 essai sont :	
	Pour les cordages en chanvre, 5 à 6 mètres ;	
	Pour les câbles en métal, 1m,50 ;	
	Pour les courroies et câbles plats, 2m,50 ;	
	Pour les chaines, toutes longueurs jusqu'à 3 mètres.	

NOTA. — Les essais spéciaux sur pièces brutes ou finies, sur pièces toutes montées, telles que pièces de charpentes ou pièces de machines, qui ne rentrent pas dans les prévisions ci-dessus, seront payés à raison de 10 francs pour l'heure de travail du personnel et des installations du laboratoire.

TABLEAU G. — *Analyses chimiques.*

N° D'ORDRE	DÉSIGNATION	PRIX
		francs
1	Matériaux hydrauliques (ciments, chaux, ciments de laitiers, laitiers) [1]	25 »
2	Avec alcalis	35 »
3	Avec soufre	40 »
4	Complète	45 »
5	Calcaires et marnes [2]	20 »
6	Avec analyse du résidu insoluble dans les acides.	30 »
7	Avec alcalis	40 »
8	Complète	45 »
9	Plâtre	25 »
10	Ciment métallique et mortiers divers	40 »
11	Asphaltes [3]	35 »
12	Analyse complète avec dosage de soufre et pyrites	45 »
13	Argiles, sables, pouzzolanes et roches [4]	30 »
14	Avec alcalis	40 »
15	Complète	60 »
16	Analyse élémentaire d'une argile ou d'un kaolin.	100 »
17	Ardoises : déterminations du calcaire et des pyrites. Analyse complète (comme pour les argiles).	20 »
18	Peintures : matières minérales	45 »
19	Peintures : analyse complète	60 »
	Fers, fontes, aciers :	
20	4 éléments (carbone, silicium, phosphore, manganèse)	40 »
21	Pour chaque élément en plus	15 »
22	Analyse complète	80 »
23	Métaux (zinc, plomb, cuivre, étain, aluminium)	80 »
24	Un seul élément étranger au métal	20 »
25	Alliages (bronze ou laiton, etc.)	40 »
26	Un seul élément	20 »
27	Micrographie d'un métal ou alliage, y compris deux photographies, l'une à 200, l'autre à 600 diamètres	30 »

1. L'analyse courante de ces matériaux comprend les dosages de la silice, du sable, de l'alumine, de l'oxyde de fer, de la chaux, de la magnésie, de l'acide sulfurique et de la perte au feu.

2. Ces analyses comprennent le résidu insoluble dans les acides, le dosage de l'oxyde de fer et de l'alumine dosés ensemble, la chaux, la magnésie et la perte au feu.

3. Roche et bitume.

4. Les résultats donnent la composition globale.

TABLEAU G (suite)

N° D'ORDRE	DÉSIGNATION	PRIX
		francs
28	Eau : degré hydrotimétrique	5 »
29	Eau pour l'alimentation des chaudières	35 »
30	Eau potable	40 »
31	Analyse complète	100 »
32	Avec numération des colonies bactériennes	150 »
33	Sels divers	30 »

Le tarif applicable aux essais autres que ceux de métaux, câbles, cordages, divers et analyses chimiques demandées isolément, sera réduit de la façon suivante :

Pour un nombre de déterminations de trois et au-dessus à faire sur un même échantillon, 5 0/0.

Pour deux ou plusieurs échantillons sur lesquels on devra faire simultanément des essais identiques, 10 0/0.

Lorsque le demandeur aura déjà fait essayer trois échantillons dans l'année, isolément ou simultanément, il lui sera fait sur tous les essais suivants, en outre des réductions précédentes, s'il y a lieu, une réduction supplémentaire de 5 0/0.

EXTRAIT DE LA CIRCULAIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU 4 JUIN 1902

Relative aux formalités à remplir pour les essais et analyses à effectuer par le laboratoire de l'École nationale des Ponts et Chaussées.

Comme conséquence immédiate de la loi de finances du 30 mars 1902 et du décret du 3 juin 1902, les demandes d'essais ou d'analyses présentées par des particuliers sont admises sans autres formalités que celles dont suit l'énumération.

Deux cas sont à prévoir :

1° Des industriels ou des particuliers n'ont besoin que d'un procès-verbal d'essais ; c'est ce qui se présente lorsqu'un industriel ou un particulier veut par exemple se renseigner sur la qualité d'un produit quelconque, ou encore lorsqu'un industriel cherche à améliorer sa fabrication personnelle ;

2° Les intéressés ont au contraire besoin d'un certificat constatant la provenance et les qualités des produits qu'ils fabriquent ou extraient couramment.

Dans le premier cas (procès-verbal d'essais), les échantillons doivent être expédiés franco par le demandeur au directeur du laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées à Paris, rue des Saints-Pères, 28, s'il s'agit seulement d'une analyse chimique, et avenue d'Iéna, 3, s'il s'agit d'essais physiques ou mécaniques, ou d'essais à la fois physiques, mécaniques et chimiques. La lettre d'envoi fait connaître la provenance exacte des échantillons (département, arrondissement, canton et commune, pour la France ; province ou division territoriale, pour les pays étrangers) ainsi que la nomenclature des essais que désire le demandeur et tous autres renseignements utiles [1].

1. Pour les essais de pierre en général, on recommande de fournir des blocs cubiques de 30 centimètres d'arête grossièrement ébauchés. Le laboratoire prélève dans ces blocs, avec les précautions voulues, les échantillons à essayer.

Pour les essais de matériaux de pavage, un pavé ou deux.

Pour les matériaux d'empierrement, 10 à 15 kilogrammes de

Le directeur des laboratoires accuse réception à l'expéditeur, en indiquant au besoin les quantités complémentaires de matière qui peuvent être nécessaires; il l'invite à effectuer le versement du coût des essais, et lui fait connaître, en outre, le délai dans lequel, sauf empêchement pour cause de force majeure, les résultats seront adressés à l'intéressé après justification du payement.

Le demandeur doit présenter l'avis du versement chez le receveur de l'enregistrement et des domaines de son canton, à moins qu'il ne préfère s'adresser directement au receveur du 1er bureau des domaines de Paris. Il doit, en tout cas, faire parvenir le récépissé du receveur au directeur des laboratoires de l'Ecole des Ponts et Chaussées; ce n'est qu'après réception de cette pièce et, le cas échéant, des quantités de matière complémentaires jugées nécessaires, que les matériaux présentés sont définitivement acceptés par les laboratoires.

Les résidus des échantillons sont conservés pendant deux mois à dater de l'envoi des résultats de l'essai; si, passé ce délai, il ne s'est produit ni réclamation, ni contestation de la part des intéressés, ces résidus sont détruits.

Dans le second cas, c'est-à-dire quand le demandeur désire un certificat de provenance et de qualité, il adresse au directeur des laboratoires une simple lettre dans laquelle il indique d'une façon complète et précise la liste des essais demandés ainsi que la situation de la carrière ou de l'usine dans laquelle doit être fait le prélèvement.

Le directeur des laboratoires demande à l'un des ingénieurs en chef des ponts et chaussées ou des mines, dont le service s'étend sur la localité d'où dépend l'usine ou la carrière, de prélever lui-même ou de faire prélever par un ingénieur ordinaire ou par un sous-ingénieur, conducteur ou contrôleur sous ses ordres, les échantillons nécessaires. Ces prélèvements sont faits dans des

pierre cassée, plus un cube de 30 centimètres d'arête si l'on demande, outre l'essai d'usure, la résistance propre de la pierre.

Pour les briques, tuiles, etc., au moins 3 pièces par essai demandé.

Pour l'essai ordinaire à vingt-huit jours des chaux et ciments, 20 à 25 kilogrammes de matière; plus, si l'on demande des essais compliqués.

Pour les analyses d'eau en général, 10 litres sont nécessaires. Il est indispensable de les envoyer dans une bonbonne neuve et rincée soigneusement dans de l'eau provenant de la source à étudier.

Pour les essais de traction des métaux, des pièces de 40 centimètres au moins de longueur et de 6 centimètres de largeur. Si le demandeur désire confectionner lui-même les éprouvettes, il devra s'entendre avec le directeur du laboratoire pour les dimensions à leur donner.

conditions telles qu'ils puissent offrir toute garantie; ils sont pris, sans avis préalable, à plusieurs jours d'intervalle, en s'entourant de toutes les précautions nécessaires. Pendant tout le temps des essais, les ingénieurs et agents des ponts et chaussées ou des mines ont libre accès dans l'usine ou la carrière, de manière à pouvoir s'assurer, en prélevant au besoin de nouveaux échantillons, que les premiers correspondent bien à la production courante. Les échantillons sont transmis au laboratoire avec un procès-verbal certifiant la provenance. les circonstances du prélèvement, ainsi que toutes autres indications utiles.

Le directeur des laboratoires accuse réception à l'ingénieur en chef et demande, s'il y a lieu, les renseignements complémentaires. Le procès-verbal qui porte mention des circonstances du prelèvement est remis à l'intéressé contre remboursement des frais d'expédition dûment justifiés.

Les résidus des échantillons sont, comme dans le premier cas, détruits après un délai de deux mois.

Les demandes d'essais ou d'analyses exemptés de la taxe, conformément à l'article 3 du décret susvisé, doivent être accompagnées d'une justification indiquant les motifs qui nécessitent l'essai.

BIBLIOGRAPHIE

G. Oslet, *Matériaux de construction et leur emploi.*

A. Debauve, *Procédés et matériaux de construction*, 1886.

E. Nivoit, *Géologie appliquée à l'art de l'ingénieur*, 1889.

R.-D. Silva, *Traité d'analyse chimique*, 1891.

J. Chappuis et A. Berget, *Leçons de physique générale*, 1891.

P. Debray, *Laboratoires de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées*, 1891.

F. Osmond, *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 1895.

Commission des méthodes d'essai des matériaux de construction (*Rapports généraux et rapports particuliers*). Sessions 1895 et 1900.

Ch.-L. Durand-Claye, Derome et R. Féret, *Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur*, 1897.

E. Bourry, *Traité des industries céramiques*, 1897.

G. Arth, *Recueil de procédés de dosage*, 1897.

P. Debray, *Cours de matériaux de construction* professé à l'École des Ponts et Chaussées, 1897-1898.

Mesnager, *Cours de matériaux de construction* professé à l'École des Ponts et Chaussées, 1900-1901.

A. Lascombe et L. Cacheux, *Les Matériaux de construction et leur emploi*, 1902.

E. Candlot, *Essais des chaux, ciments et mortiers.*

H. Le Chatelier, *Essais des matériaux hydrauliques.*

L. Gages, *Essais des métaux.*

J. Malette, *les Travaux publics, la Revue technique, Bulletin de la Société des ingénieurs coloniaux, The Builder* (Documents publiés de 1902 à 1905).

Ganot, Maneuvrier, *Traité élémentaire de physique*, 1903.

Ledebur, *Manuel de la métallurgie du fer*, 1903.

A. Martens, *Traité des essais des matériaux destinés à la construction des machines*, 1904.

L. Eyrolles, Bénézech et Douat, *Pratique des travaux, Matériaux de construction*, 1904.

L. Guillet, *Les Aciers spéciaux*, 1904.

E. Hospitalier, *Formulaire de l'électricien*, 1905.

L. Troost et Ed. Péchard, *Traité élémentaire de chimie*, 1905.

U. Le Verrier, *Procédés métallurgiques et étude des métaux* 1905.

Frésénius, *Traité d'analyse qualitative*, 11e édition française.

E. Candlot, *Ciments et chaux hydrauliques*, 1905.

L. Guillet, *Etude industrielle des alliages métalliques*, 1906.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

A. — RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE CHIMIE

I. — Chimie générale

CHAPITRE I

Lois et principes

	Pages.
Loi des poids ou de la conservation de la matière	1
Loi des proportions définies ou de Proust	1
Loi des proportions multiples ou de Dalton	1
Loi des volumes ou de Gay-Lussac	2
Loi de Dulong et Petit	2
Loi de l'isomorphisme de Mitscherlich	2
Principe du travail moléculaire	2
Principe de l'équivalence calorifique des transformations chimiques	2
	2
Principe du travail maximum	2
Poids moléculaires	3
Poids atomiques	3
Valences	3
Classification des principaux éléments d'après leur valence	3
Classification des métalloïdes en familles naturelles (Dumas)	4
Classification des métaux (Thénard)	4
Lois de Berthollet	5
Action des acides sur les sels	5
Action des bases sur les sels	5
Action des sels sur les sels	5

Pages.

II. — Chimie analytique 6

CHAPITRE II

Opérations analytiques

Prise d'échantillons 7
Pesée 8
Attaque 10
Dissolution 10
Fusion 11
Évaporation 11
Précipitation 12
Décantation 13
Filtration 14
Lavage (ou édulcoration) 15
Dessiccation 15
Calcination 16
Cristallisation 17
Distillation 18
Sublimation 18
Electrolyse 18
Colorimétrie 19

CHAPITRE III

Méthodes d'analyse

Analyse pondérale 20
Analyse volumétrique 20

CHAPITRE IV

Réactifs

Eau 21
Alcool 21
Ether 22
Chloroforme 22
Sulfure de carbone 22
Acide sulfurique 22
Acide azotique 23
Acide chlorhydrique 23
Acide tartrique 23
Hydrogène sulfuré 24
Potasse et soude 24

Pages.
Ammoniaque 24
Baryte 25
Chaux 25
Sulfure d'ammonium 25
Phosphate de sodium 25
Oxalate d'ammonium 26
Acétate de sodium 26
Carbonate de sodium 26
Carbonate d'ammonium 27
Molybdate d'ammonium 27
Chlorure d'ammonium 28
Chlorure de baryum 28
Sulfate de magnésium 28
Azotate d'argent 29
Acétate de plomb 29
Chlorure de platine 29
Bisulfate de potassium 30
Papier de tournesol 30
Indigo 31
Phénolphtaléine 31
Diméthylorange 31

CHAPITRE V

Classification des métaux

Premier groupe 32
Deuxième groupe 32
Troisième groupe 32
Quatrième groupe 33
Cinquième groupe 33

CHAPITRE VI

Réactions des corps

Potasse 34
Soude 35
Ammoniaque 36
Baryte 36
Chaux 37
Magnésie 38
Alumine 39
Oxyde de zinc 40
Oxyde de manganèse 40

Pages
Oxyde de nickel 42
Oxyde de fer 43
Oxyde de plomb 46
Oxyde de cuivre 47
Oxyde d'étain 47
Oxyde de molybdène 48
Oxyde de tungstène 48
Oxyde de vanadium 48
Acide chromique 49
Acide sulfurique 50
Acide phosphorique 50
Anhydride carbonique 51
Acide chlorhydrique 52
Acide silicique 52
TABLE POUR LE CALCUL DES ANALYSES 53
POIDS ATOMIQUES DES CORPS SIMPLES 56

B. — RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE PHYSIQUE

CHAPITRE VII

Propriétés de la matière. — Pesanteur

Etats physiques des corps 57
Propriétés physiques 58
Mesures 58
Vis micrométrique 61
Mesure des surfaces 62
Mesure des volumes 63
Mesure des masses 63
Méthodes de pesées 64
1° Simple pesée 64
2° Double pesée ou pesée de Borda 64
Balance romaine 64
Mesure des forces 65
Lois de la chute des corps 66
1° Loi des espaces 66
2° Loi des vitesses 66

CHAPITRE VIII

Propriétés mécaniques des corps

Pages.

Mouvement 67
Elasticité 69
Ténacité ; résistance à la rupture 71
Compression ; écrasement 72
Flexion 72
Torsion 73
Choc 74
Principes et théorèmes de mécanique :
A. Cinématique 74
Mouvement rectiligne uniformément varié 74
B. Statique 75
Composition d'un nombre quelconque de forces appliquées à un corps solide. Théorème 75
Résultante d'un nombre quelconque de forces parallèles. Théorème 75
C. Dynamique 75
Principe de l'inertie 75
Principe du mouvement relatif 75
Principe de la réaction égale et contraire à l'action 75
Théorème du travail ou des forces vives 76
1° Cas d'un point matériel 76
2° Cas d'un système 76
Principe de la conservation de l'énergie 76

CHAPITRE IX

Hydrostatique

Presse hydraulique 77
Manomètres 78
Manomètres métalliques 79
Détermination des densités 80
Densité des solides 80
Procédé du flacon 80
Procédé de la balance hydrostatique 83
Densité des liquides 84
Lois de l'hydrostatique :
Liquides soumis à l'action de la pesanteur. Théorème fondamental 84
Liquides superposés. Principe d'Archimède 85
Equilibre des corps flottants 85

Pages.

Capillarité. Loi de Jurin 85

Pneumatique :

Compressibilité des gaz. Loi de Mariotte 85
Mélange des gaz 86
Solubilité des gaz. Première loi 86
— Deuxième loi 86

CHAPITRE X

Chaleur

Thermométrie 87
Dilatation des solides 88
Calorimétrie 88
Conductibilité 89
Problème du mur 89
Pyromètre à radiations calorifiques 90
Lunette pyrométrique 91
Emploi de la lunette pyrométrique 92
Télescope pyrométrique 93
Emploi du télescope pyrométrique 94

Lois de la chaleur :

Dilatation des gaz 93
Lois de Gay-Lussac. Première loi 95
Deuxième loi 95
Troisième loi 95
Mélange des gaz et des vapeurs. Loi de Dalton 96
Changements d'état des corps 96
Lois de la fusion 96
Lois de la solidification 96
Lois de l'ébullition 96
Calorimétrie. Loi de Dulong et Petit 97
Chaleur rayonnante 97
Réfraction 97
Equivalent mécanique de la chaleur. Principe de l'équivalence 97

CHAPITRE XI

Optique

Lentilles 98
Microscope 98
Pyromètre à radiations lumineuses 99

Lois de l'optique :

Pages.
Réflexion 100
Réfraction 100

CHAPITRE XII

Électricité

Pile thermo-électrique 103
Pyromètre H. Le Chatelier 104
Réglage 107
Electrolyse 110
Lois qualitatives 111
Lois quantitatives 111
Piles hydro-électriques 111
Galvanomètre. Ampèremètre. Voltmètre 113
Lois de l'électricité :
A. Electricité statique 115
Loi de Coulomb 115
Distribution de l'électricité 115
B. Electricité dynamique 115
Loi du contact ou loi de Volta 115
Loi des contacts successifs 115
Lois de Kirschoff 115
Loi d'Ohm 116
Lois de Faraday 116
C. Magnétisme 116
Loi de Coulomb 116
D. Electro-magnétisme 116
Loi d'Ampère 116
Action d'un courant rectiligne sur un aimant 116
E. Electro-dynamique 116
Action des courants sur les courants 116
1° Courants parallèles 116
2° Courants croisés 117
3° Courants sinueux 117
F. Induction. — Loi de Lenz 117

DEUXIÈME PARTIE

ANALYSES ET ESSAIS DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

CHAPITRE XIII

Pierres naturelles. — Calcaires

Analyse chimique :

Pages.

Dissolution du calcaire 122
Etat physique du calcaire 122
Homogénéité des bancs et intimité du mélange de calcaire, de sable fin et d'argile 122
Proportion de sable fin et d'argile 123
Proportion de sable quartzeux ou de gros sable 123
Résidu insoluble dans les acides 124
Alumine et oxyde ferrique 124
Chaux 124
Magnésie 124
Eau et anhydride carbonique 125
Matières organiques 125
Eau 127
Lévigation 127
Séparation de l'alumine et de l'oxyde ferrique 127
Manganèse 128

Analyse sommaire :

Anhydride carbonique (seul) 129
Première méthode 129
Deuxième méthode 129
Chaux 130
1° Méthode basée sur l'emploi de la formule $CaCO^3$ 130
2° Autre méthode 130

Essais :

Structure 131
Cassure 131
Homogénéité 132
Couleur 132
Conductibilité thermique 132
Dilatation linéaire 132
Hygroscopicité 132
Densité 133
Gélivité 133

Pages.
Dureté 134
Résistance à l'écrasement 137

Pratique des essais :

Echantillons 137
Eprouvettes 138
Densité 140
Résistance à l'écrasement 140
Porosité 141
Résistance à la rupture par flexion 141
Résistance à l'usure par frottement 142
Résistance à la gelée 142
Observation générale sur les conclusions à tirer des essais. 144

Empierrements :

Prise d'échantillon 145
Composition granulométrique 145
Composition minéralogique 145
Essais proprement dits des pierres 145

Pavages et dallages :

Prise d'échantillons 147
Essais 147
Provenance et nature des matériaux 147
Essais des matériaux avant emploi 148

Interprétation des résultats :

1° Analyse chimique 148
Oxygène 148
Silicium 148
Carbone 148
Soufre 148
Hydrogène 149
Potassium 149
Sodium 149
Calcium 150
Magnésium 150
Fer 150
Manganèse 150
Aluminium 150
2° Essais 152
Extrait du cahier des charges général du Ministère des Travaux publics 155

CHAPITRE XIV

Ardoises

Analyse chimique :

Pages.

Silice 157
Alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie, alcalis 157
Perte au feu 157
Soufre 157
Essai chimique 158

Essais :

Essai de flexibilité 159
Essai de perméabilité 159
Essai de porosité 159
Rupture par flexion 159
Elasticité 161
Ecrasement 163

Pratique des essais :

Echantillons 165
Eprouvettes 166
Résistance à la rupture par flexion 167
Détermination de l'élasticité 167
Usages 168

CHAPITRE XV

Amendements. — Terres. — Sables

I. Amendements

Marnage 170
Chaulage 173
Plâtrage 175
Amendements divers 175
Ecobuage 176

Analyse chimique :

Marne 177
Chaux 178
Plâtre 178
Cendres et écumes de défécation 179

II. Terres

Coloration 181
Densité 181
Facilité d'absorption 181

Analyse physico-mécanique :

Pages.

Dosage du calcaire 183

Analyse chimique :

Analyse sommaire 186
Réaction du sol 186
Eau hygrométrique 186
Perte au feu (ou perte au rouge) 186
Humus 186
Calcaire 186

Analyse complète :

Résidu insoluble dans les acides 187
Alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie 187
Alcalis 187
Analyse du résidu insoluble 188
Azote (ammoniacal et organique) 188
Anhydride phosphorique 189
Séparation de la potasse et de la soude 190
Interprétation des résultats 190

III. Sables

Analyse chimique :

Silice 204
Alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie, perte au feu 205
Argile 205

Essais :

A. Composition granulométrique, forme de grains 206
B. Densité 206
C. Nature minéralogique 207
D. Essais des sables mis en œuvre 207
Extrait du cahier des charges général du Ministère des Travaux publics 207

CHAPITRE XVI

Bitumes. — Asphaltes. — Goudrons

I. Bitumes

II. Asphaltes

Asphalte factice 211

III. Goudrons

Analyse chimique des bitumes et des asphaltes :

Dosage du bitume 213

Pages.
Matières étrangères 214
Recherche du brai de gaz 215
Pratique des essais :
Essais des asphaltes 216
Essais d'homogénéité 216
Détermination de la proportion de bitume 217
Analyse chimique de la roche privée de bitume 217
Essais des bitumes 217
Goudrons 217
Interprétation des résultats 218
Extrait du cahier des charges général du Ministère des Travaux publics 220

CHAPITRE XVII

Bois

Analyse chimique 221
Pratique des essais :
I. Caractères physiologiques et essais organoleptiques 223
II. Vices et tares 224
III. Aptitude à la conservation 225
IV. Essais physiques 225
V. Essais mécaniques 225
A. Résistance à la flexion. Module d'élasticité 225
B. Résistance à l'écrasement 227
C. Résistance à la traction 227
D. Résistance au cisaillement 228
E. Résistance à l'usure par le frottement 228
Bois pour pavage 229
Résultats des analyses et des essais 229
Extrait du cahier des charges général du Ministère des Travaux publics 233

CHAPITRE XVIII

Charbons

Analyse et essais chimiques :
Eau 235
Cendres 235
Essai pour coke et parties volatiles 235
Pouvoir calorifique 236
Expérience calorimétrique avec les calculs 239

Essais physiques :

Pages.

Poids spécifique réel ... 241
Poids spécifique apparent ... 241
Porosité ... 241
Interprétation des résultats ... 242

CHAPITRE XIX

Chaux et ciments. — Trass et pouzzolanes

I. Chaux et ciments

Chaux aériennes ... 244
Prise et durcissement des agglomérants hydrauliques ... 245
Indice d'hydraulicité ... 247
Chaux hydrauliques ... 249
Ciments ... 250
Ciments naturels ... 250
Ciments artificiels ... 251

Analyse chimique :

Silice ... 253
Alumine et oxyde ferrique ... 253
Chaux ... 254
Magnésie ... 254
Perte au feu ... 254
Anhydride sulfurique ... 254
Alcalis ... 255
Chaux libre ... 256
Séparation de l'alumine et de l'oxyde ferrique ... 256
Séparation de l'eau et de l'anhydride carbonique ... 256

Interprétation des résultats :

Silice ... 257
Alumine ... 257
Oxyde ferrique ... 257
Chaux ... 258
Magnésie ... 258
Anhydride sulfurique ... 258
Alcalis ... 259
Perte au feu ... 259

Pratique des essais ... 260

Essais des ciments :

§ 1. Finesse de mouture ... 260
§ 2. Poids spécifique ... 261
§ 3. Densité apparente ... 261
§ 4. Analyse chimique ... 262

Pages.

§ 5. Essais d'homogénéité 263
§ 6. Confection des pâtes et mortiers normaux 263
1° Pâte normale de ciment 263
2° Mortiers normaux 264
§ 7. Essais de prise 266
1° Pâtes de ciment 266
2° Mortiers 267
§ 8. Essais de rupture par traction 268
§ 9. Essais de rupture par compression 271
§ 10. Essais de rupture par flexion 272
§ 11. Essais de déformation 273
§ 12. Essais de rendement 275
§ 13. Essais de porosité 275
§ 14. Essais de perméabilité 277
§ 15. Essais de décomposition par l'eau de mer 278
§ 16. Essais d'adhérence 279

Essais des chaux :

1° Chaux hydrauliques 281
§ 1. Finesse de blutage 281
§ 2. Poids spécifique 282
§ 3. Densité apparente 282
§ 4. Analyse chimique. Essais d'homogénéité 282
§ 5. Confection des pâtes et mortiers normaux 282
1° Pâte normale de chaux 282
2° Mortiers normaux 282
§ 6. Essais de prise 283
§ 7. Essais de rupture (traction, compression, flexion) 283
§ 8. Essais de déformation 283
§ 9. Essais de rendement, de porosité et de perméabilité 283
§ 10. Essais de décomposition par l'eau de mer 283
§ 11. Essais d'adhérence 283
2° Chaux grasses 284

Considérations sur les essais 284

Arrêté ministériel du 2 juin 1902 concernant les fournitures de ciments et de chaux hydrauliques 286

Titre premier. — Clauses applicables à tous les marchés 286

Titre II. — Clauses applicables aux marchés pour fourniture sans emploi 290

Cahier des charges-type n° 1 pour les fournitures de ciments Portland destinées à des travaux en prise à la mer 291

Cahier des charges-type n° 2 pour la fourniture de chaux hydraulique destinée à des travaux en prise à la mer 293

Cahier des charges-type n° 3 pour les fournitures de ciments Portland destinées à des travaux non en prise à la mer 295

Cahier des charges-type n° 4 pour les fournitures de ciments de grappiers 926

Pages.

Cahier des charges-type n° 5 pour la fourniture de ciments et de chaux hydrauliques ne rentrant pas dans les catégories pour lesquelles des cahiers des charges spéciaux sont prévus..... 298

II. Trass et pouzzolanes

Analyse chimique :

Eau hygrométrique..... 302
Perte au feu..... 302
Anhydride carbonique..... 302
Sable quartzeux..... 302
Silice..... 303
Alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie, alcalis..... 303

Essais :

Essais des trass..... 304
§ 1. Préparation des échantillons..... 304
§ 2. Finesse de mouture, poids spécifique, densité apparente et analyse chimique..... 304
§ 3. Essais d'homogénéité..... 305
§ 4. Confection des pâtes et mortiers normaux..... 305
§ 5. Essais de prise..... 305
1° Pâtes de trass et de chaux..... 305
2° Mortiers de trass, de chaux et de sable..... 306
§ 6. Essais de rupture (traction, compression, flexion)..... 306
§ 7. Essais de rendement, de porosité, de perméabilité, de décomposition par l'eau de mer et d'adhérence..... 306

CHAPITRE XX

Plâtres

Analyse chimique :

Perte au feu..... 315
Eau..... 316
Anhydride carbonique..... 316
Matières combustibles..... 316
Anhydride sulfurique..... 316
Résidu insoluble dans les acides..... 317
Alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie, perte au feu..... 317

Essais :

A. Finesse de mouture..... 319
B. Analyse chimique..... 319
C. Essais de prise..... 320
D. Essais de rendement..... 320

CHAPITRE XXI

Mortiers et bétons

Analyse chimique :

Pages.
Mortiers 323
Bétons 326
Essais 327
Interprétation des résultats 328

CHAPITRE XXII

Argiles. — Briques et tuiles

I. Argiles

Analyse chimique :

Analyse qualitative 333
Action de l'eau 333
Action de l'acide chlorhydrique 334
Analyse quantitative 334
Eau hygrométrique 334
Perte au feu 335
Anhydride carbonique 335
Sable quartzeux 335
Silice 336
Alumine et oxyde ferrique 336
Chaux 336
Magnésie 336
Alumine seule. Oxyde ferrique seul 336
Alcalis (potasse et soude) 337

Essais :

Essai de texture 339
Essai de plasticité 342
Essai de fusibilité 343
Essai pyrométrique 344

II. Briques et tuiles

1° Briques :
Briques crues 345
Briques cuites 345
Qualité des briques 347
Variétés de briques 348
2° Tuiles :
Qualité des tuiles 351

Pages.
Analyse chimique des briques et des tuiles..... 355
Essais :
Essais chimiques..... 356
1° Recherche de la chaux et de la magnésie..... 356
2° Détermination des sels solubles..... 356
Essais de chantier..... 356
Essais de laboratoire :
Echantillons..... 357
Prescriptions générales..... 357
Essais physiques..... 358
1° Observation de la structure ou de l'homogénéité..... 358
2° Poids spécifique..... 358
3° Densité apparente..... 359
4° Porosité absolue..... 359
5° Porosité relative ou poids d'eau absorbée dans un temps déterminé..... 359
6° Perméabilité: tuiles..... 360
7° Essais de résistance à la gelée..... 360
Essais mécaniques..... 361
Briques et matériaux analogues..... 361
1° Résistance à la rupture par écrasement..... 361
2° Résistance à la rupture par flexion..... 362
Briques..... 362
Tuiles..... 362
3° Résistance à l'usure par frottement..... 362
Interprétation des résultats..... 363
Extrait du cahier des charges général du Ministère des Travaux publics..... 364

CHAPITRE XXIII

Fers. — Aciers. — Fontes

FER. — ACIER

Carbone de cémentation..... 374
Carbone de trempe..... 375
Carbone de recuit..... 375
Graphite..... 375

FONTE

Analyse chimique des composés ferreux :
Carbone..... 378
Manganèse..... 382
Phosphore..... 384

Pages.
Silicium 385
Soufre 386
Cuivre 386
Essai aux acides 387
Métallographie microscopique :
Préparation de l'échantillon 388
Polissage 388
Attaque 390
Examen au microscope 392
Photographie de l'image 400
Analyse métallographique 402
Diagramme de Roozeboom 405
Essais :
Traction 410
Machines à leviers 412
Machines à manomètres 414
Machine Thomasset 414
Machine du colonel Maillard 416
Compression 417
Choc 419
Flexion 420
Torsion 422
Fragilité 423
Essais de fabrication 424
Essais de façonnage à froid 424
Essais de façonnage à chaud 424
Essai des crochets 425
Essai de pliage 425
Essai de soudabilité 426
Essai de perçage ; essai de rabattement 426

Pratique des essais des métaux

PREMIÈRE PARTIE. — *Essais physiques*

Chapitre I. — Examen physique 428
Observation, sans appareils spéciaux, de l'aspect extérieur et des cassures 428
Chapitre II. — Détermination de certaines constantes physiques 429
Détermination de la densité 429
Chapitre III. — Etude physique des variations d'état des métaux sous l'influence des changements de température 431
Détermination des températures critiques par la méthode du refroidissement 431
Variation de la conductibilité électrique 431
Chapitre IV. — Etude de la trempe 431

DEUXIÈME PARTIE. — *Essais chimiques*

Pages

Chapitre I. — Analyse des métaux et alliages 432
Chapitre II. — Essais de corrosion et d'adhérence des revêtements protecteurs 432

TROISIÈME PARTIE. — *Essais mécaniques. Recommandations communes à toutes les méthodes d'essai*

Chapitre I. — Observations générales 433
Chapitre II. — Préparation des éprouvettes 434
Etat du métal 434
Emplacement et prélèvement des prises d'essai 435
Confection des barreaux d'essai 436
Chapitre III. — Etude de l'influence de la température sur les résultats des essais 438
Essais pratiqués à des températures déterminées 438
Essais courants pratiqués aux températures ordinaires 439
Chapitre IV. — Observations générales sur les appareils d'essai 440
Appareils opérant par action graduée 440
Appareils opérant par action brusque 444
Chapitre V. — Examen des grandeurs à mesurer 444

QUATRIÈME PARTIE. — *Essais mécaniques. Etude détaillée des diverses méthodes d'essai*

Première classe. — Méthodes d'épreuve opérant par action graduée

Chapitre I. — Essais de traction 446
Limites de la période élastique 446
Efforts et allongements développés dans la période des déformations permanentes ... 447
Mesure des efforts et des allongements 448
Dimensions des éprouvettes. Section et longueur utiles 448
Conduite de l'essai 451
Chapitre II. — Essais de compression 452
Essais sur pièces courtes 452
Essais sur pièces longues (flambement) 452
Chapitre III. — Essais de flexion 453
Essais sur éprouvettes 453
Essais sur pièces finies 454
Chapitre IV. — Essais de pliage, cintrage et courbage 455
Pliage 455
Cintrage 456
Courbage 457

Pages.

Chapitre V. — Essais mixtes (cisaillement et poinçonnage). 457
Cisaillement 457
Poinçonnage 458

Deuxième classe. — Méthodes d'épreuve opérant par action brusque

Chapitre I. — Essai de flexion par choc 459
Epreuve de l'escarpolette 461
Chapitre II. — Essais de pénétration superficielle par choc. 462

Troisième classe. — Etude de la dureté et de la fragilité

Chapitre I. — Epreuve de pliage après écrouissage à froid par poinçonnage ou après incision 463

Quatrième classe. — Essais de fabrication

Chapitre I. — Essais de façonnage à froid 465
Essai d'élargissement au mandrin 465
Essai d'emboutissage 466
Essais d'aplatissement et d'écrasement 466
Chapitre II. — Essais de façonnage à chaud sur les fers et aciers 467
Essais de pliage 467
Essais de cintrage 467
Essais d'emboutissage 467
Essais des crochets 467
Essais de perçage 468
Essais de rabattement 468
Essais de soudabilité 468

Cinquième classe. — Essais spéciaux pratiqués sur certaines pièces finies

Chapitre I. — Essais des fils métalliques 469
Essais de traction 469
Essais de pliage 469
Essais d'enroulement 470
Essais de torsion 471
Chapitre II. — Essais des câbles métalliques 471
Essais de traction 471
Essais de souplesse 472
Chapitre III. — Essais des chaînes 473
Essais de traction graduée 473
Chapitre IV. — Essais des rivets 474
Chapitre V. — Essais des tuyaux et tubes 475
Essai de cintrage 475
Essai d'élargissement au mandrin 475
Essais d'écrasement et d'aplatissement 475
Essais de retournement 475
Essai de rabattement de la collerette 476

Pages.

Chapitre VI. — Essais à la pression hydraulique..... 476
Epreuve des appareils à vapeur..... 476
Essais des tuyaux, tubes, obus, etc 477

Interprétation des résultats :

1° Résultats fournis par l'analyse chimique..... 478
2° Résultats fournis par les essais..... 481
Extrait du cahier des charges général du Ministère des Travaux publics..... 486

CHAPITRE XXIV

Aciers spéciaux

Aciers au nickel..... 491
Aciers au manganèse..... 494
Aciers au chrome..... 494
Aciers au tungstène..... 495
Aciers au molybdène..... 495
Aciers au silicium..... 496
Aciers au vanadium..... 496
Aciers spéciaux divers..... 496

Analyse chimique :

Nickel..... 498
Chrome..... 498
Tungstène..... 499
Molybdène..... 499
Vanadium..... 499
Essais..... 502

CHAPITRE XXV

Cuivre. — Alliages de cuivre

I. Cuivre

Propriétés physiques..... 503
Propriétés chimiques..... 504
Usages. Conditions de recette..... 504

II. Alliages de cuivre

Propriétés physiques..... 505
Propriétés chimiques..... 508
Conditions de recette : 1° Bronzes..... 510
2° Laitons..... 512

Analyse chimique :

Pages.
Essai qualitatif..... 512
Analyse quantitative..... 513
Dosage de l'étain..... 513
Dosage du plomb..... 513
Dosage du cuivre..... 514
Dosage du zinc..... 514
Dosage du fer..... 515
Dosage du nickel..... 515
Dosage du phosphore..... 515
Dosage de l'arsenic, antimoine, etc..... 516
Analyse par cémentation..... 516
Essais..... 517
Extrait du cahier des charges général du Ministère des Travaux publics..... 517

CHAPITRE XXVI

Zinc. — Blanc de zinc

I. Zinc

Analyse chimique..... 521
Essais..... 523

II. Blanc de zinc

Analyse :

Carbonate de zinc..... 523
Sulfate de zinc..... 524
Sulfate de baryum..... 524
Carbonate de calcium..... 524
Sulfate de calcium..... 525
Moyens servant à différencier la céruse du blanc de zinc... 528
Extrait du cahier des charges général du Ministère des Travaux publics..... 529

CHAPITRE XXVII

Plomb. — Céruse. — Minium

I. Plomb

Analyse chimique..... 531
Essais..... 532

II. Céruse

III. Minium

Pages.
Humidité 533
Plomb total 534
Impuretés 534
Bioxyde de plomb 534
Protoxyde de plomb 534
Carbonate de plomb 534
Extrait du cahier des charges général du Ministère des Travaux publics 534

CHAPITRE XXVIII

Aluminium, nickel et leurs alliages

I. Aluminium

Alliages 536
Analyse chimique 536
Essais 536

II. Nickel

Alliages 537
Analyse chimique 538
Essais 539

CHAPITRE XXIX

Verres

Verre armé 542
Tuiles en verre 544
Pierre de verre 544
Tuyaux métalliques à revêtement intérieur en verre 545
Prismes Luxfer 546
Verres spéciaux 547

CHAPITRE XXX

Eaux potables

Limpidité 548
Fraîcheur 548
Odeur 549

Pages.

Saveur 549
Matières étrangères 549
Gaz 549

Analyse qualitative :

Recherche des acides 549
Acide sulfurique (sulfates) 549
Acide chlorhydrique (chlorures) 550
Acide carbonique libre et bicarbonates 550
Acide sulfhydrique (sulfures) 550
Acide azotique 550
Acide azoteux 550
Recherche des métaux 550
Calcium 550
Magnésium 550
Potassium, sodium 551
Ammonium 551
Plomb 551
Cuivre 551
Zinc 551
Arsenic 551

Analyse quantitative :

Résidu total 552
Silice 552
Alumine, oxyde ferrique, chaux, magnésie 552
Potasse et soude 552
Ammoniaque 553
Acide sulfurique 553
Chlore 553
Acide azotique 554
Acide azoteux 554
Gaz dissous : 1° par ébullition 555
2° par le vide 555
Oxygène 555
Matières organiques : Méthode de Schulze-Tromsdorff 555
Méthode de M. Albert Lévy 556

Procédés rapides d'analyse :

Essai hydrotimétrique 558
Mode opératoire 560
Détermination des sels de calcium, des sels de magnésium et de l'acide carbonique 561

Procédé de MM. Pignet et Hue :

1° Recherche et dosage des nitrites 565
2° Recherche et dosage des nitrates 565
3° Recherche et dosage de l'ammoniaque libre et de l'ammoniaque albuminoïde 566
4° Recherche et dosage des chlorures 567

Pages.
5° Dosage des matières organiques 567
6° Détermination du degré hydrotimétrique 567
7° Recherche du plomb, du fer, du cuivre et du zinc 567

Interprétation des résultats :

Résidu total 568
Ammoniaque 569
Chlorures 569
Nitrates 569
Nitrites 569
Oxygène 570
Acide carbonique 570
Matières organiques 570
Examen microscopique et analyse bactériologique 574

APPENDICE

Décret du 3 juin 1902 fixant les tarifs de perception des essais et analyses faits aux laboratoires de l'Ecole des Ponts et Chaussées 577
Tarif des essais et analyses effectués par les laboratoires d'essais physiques, mécaniques et chimiques de l'École nationale des Ponts et Chaussées 579
Tableau A. — Pierres naturelles et artificielles. Matériaux pour couverture. (Confection des éprouvettes d'essai.) 579
Tableau B. — Pierres naturelles et artificielles. Matériaux pour couverture. (Essais divers.) 581
Tableau C. — Chaux hydrauliques et ciments 582
Tableau D. — Sables 584
Tableau E. — Bois de construction ou de pavage. (Essais divers.) 585
Tableau F. — Métaux, câbles, cordages et divers. (Essais divers.) 586
Tableau G. — Analyses chimiques 589
Extrait de la circulaire des travaux publics du 4 juin 1902, relative aux formalités à remplir pour les essais et analyses à effectuer par le laboratoire de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées 591
BIBLIOGRAPHIE 594

Tours, imprimerie Deslis Frères, 6, rue Gambetta.

BIBLIOTHÈQUE DU CONDUCTEUR

DE

TRAVAUX PUBLICS

PUBLIÉE

SOUS LES AUSPICES

DE

MM. les Ministres des Travaux publics, de l'Agriculture, de l'Instruction publique, du Commerce et de l'Industrie, de l'Intérieur, des Colonies, de la Justice.

ENSEMBLE DES CONNAISSANCES
INDISPENSABLES AUX CONDUCTEURS DES PONTS ET CHAUSSÉES
ET CONDUCTEURS MUNICIPAUX, AGENTS VOYERS,
CONTRÔLEURS DES MINES, CHEFS DE SECTION, ARCHITECTES VOYERS, ENTREPRENEURS
CONDUCTEURS DE TRAVAUX, CHEFS DE DISTRICT, INSPECTEURS,
VÉRIFICATEURS, ETC.

Programme. — Conditions de souscription.
Abrégé de la table des matières des 55 volumes parus.

PARIS
H. DUNOD ET E. PINAT, ÉDITEURS
49, Quai des Grands-Augustins, 49

1906

PROGRAMME ET PRIX DES VOLUMES
PARUS ET A PARAITRE

GÉNÉRALITÉS

*	1	Mathématiques (2e édition)...	12 »
*	2	Mécanique, hydraulique et thermodynamique (2e édition)	15 »
*	3	Chimie et physique appliquées	12 »
*	4	Résistance des matériaux : T. I.....	15 »
*	5	Résistance des matériaux : T. II.....	15 »
	5bis	T. III.....	12 »
		Topographie. Etudes et opérations sur le terrain :	
*	6	1er vol. : Instruments.....	12 »
*	7	2e vol. : Méthodes.....	15 »
	8	Travaux graphiques.....	12 »
*	9	Maçonneries.....	10 »
*	10	Bois et métaux.....	8 »
*	11	Tracé et terrassements.....	15 »
*	12	Fouilles et fondations.....	12 »
*	13	*Droit civil*.....	8 »
*	14	*Droit administratif général.*	9 »
	15	*Economie politique et statistique*.....	15 »
*	16	*Droit commercial et industriel*.....	10 »
*	17	*Procédure civile et droit pénal*.....	8 »
*	18	*Exécution des travaux publics*.....	12 »
*	19	*Organisation des services de travaux publics*.....	8 »
*	20	*Comptabilité des travaux publics et tenue des bureaux*	12
*	21	*Comptabilité départementale, vicinale, communale et commerciale*.....	12 »
*	22	*Rôle social et économique des voies de communication*..	10 »
*	23	*Rapports de service*.....	12 »
*	24	Hygiène.....	7 50

SPÉCIALITÉS

Section I. — Chausseés et ponts

25	Ponts en maçonnerie.....	12 »
26	Ponts en bois et en métal...	15 »
* 27	Routes et chemins vicinaux..	12 »
28	*Droit administratif. De la voirie*.....	8 »
	Total.....	47 »

4 volumes. — En souscription, 43 fr.

Section II. — Service municipal

* 29	Voie publique.....	12 »
* 30	Distribution des eaux.....	15 »
* 31	Egouts. — Assainissement...	18 »
* 32	Plantations, jardins et promenades.....	11 »
* 33	Eclairage (2e édition).....	15 »
34	*Droit administratif. De la voirie urbaine*.....	8 »
	Total.....	79 »

6 volumes. — En souscription, 72 fr.

Section III. — Navigation

35	Fleuves et rivières navigables.	12 »
36	Canaux et rivières canalisées.	12 »
37	Ports maritimes..	15 »
38	Phares et balises.....	10 »
39	Exploitation des ports.....	9 »
40	Pisciculture, ostréiculture, myticulture.....	12 »
* 41	*Législation des eaux*.....	15 »
	Total.....	85 »

7 volumes. — En souscription, 77 fr.

Section IV. — Chemins de fer et tramways

* 42	Construction et voie.....	12 50
* 43	Locomotive et matériel roulant	12 »
* 44	Exploitation technique.....	16 »
45	Exploitation commerciale....	8
* 46	Tramways et automobiles....	12 »
47	*Législation des chemins de fer et tramways*.....	9 »
* 48	*Contrôle des chemins de fer.*	12 »
	Total.....	81 50

7 volumes. — En souscription, 74 fr.

SECTION V. — MINES. — MACHINES

* 49	Géologie et minéralogie appliquées	12 »
* 50	Exploitation des mines (2e éd.).	9 »
* 51	Chaudières à vapeur	12 »
* 52	Machines à vapeur	15 »
* 53	Machines hydrauliques	10 »
* 54	*Législation et contrôle des mines*	12 »
* 55	*Législation et contrôle des appareils à vapeur*	8 »
	Total	78 »

7 volumes. — Ensemble, 71 fr.

SECTION VI. — CONSTRUCTIONS CIVILES, ADMINISTRATIVES ET MILITAIRES

* 56	Architecture	15 »
* 57	Charpente et couverture	10 »
* 58	Menuiserie, serrurerie, plomberie, peinture, vitrerie	10 »
59	Fumisterie, chauffage et ventilation	10 »
60	Devis et évaluations	15 »
61	Edifices publics pour villes et villages	15 »
62	*Législation du bâtiment*	8 »
	Total	83 »

7 volumes. — En souscription, 75 fr.

SECTION VII. — AGRICULTURE

* 63	Agriculture	9 »
* 64	Hydraulique agricole. 1re et 2e parties	12 »
* 65	Id. 3e partie	15 »
* 66	Id. 4e à 8e partie	15 »
* 67	Génie rural	10 »
68	*Code rural*	8
	Total	69 »

6 volumes. — En souscription, 62 fr.

SECTION VIII. — ÉLECTRICITÉ. — PHOTOGRAPHIE

* 69	Théorie et production de l'électricité	12 »
* 70	Applications industrielles de l'électricité	12 »
* 71	Photographie. Reproduction des dessins	9 »
	Total	33 »

3 volumes. — Ensemble, 30 fr.

SECTION IX. — SCIENCES MILITAIRES

* 72	Génie	12 »
* 73	Sciences et arts militaires	12 »
	Total	24 »

2 volumes. — En souscription, 22 fr.

Les volumes précédés d'un astérisque sont parus (la table des matières de chacun d'eux est envoyée franco sur demande), et tous les autres sont à l'impression ou en préparation.

CONDITIONS DE SOUSCRIPTION

Tous les volumes de la Bibliothèque du Conducteur des Travaux publics, *dont chaque page contient la matière des livres grand in-8°*, sont de format in-16 (19 × 13), composés avec des caractères neufs, de lecture facile, imprimés sur beau papier, pourvus d'une solide et élégante reliure en peau souple ; ils peuvent être aisément portés sur les travaux.

Pour éviter les surprises désagréables auxquelles ont souvent donné lieu les souscriptions à certaines publications de longue haleine par l'augmentation inattendue du nombre de volumes et du prix prévu, *nous avons décidé de fixer dès maintenant la quantité des livres à paraître, leurs prix et les conditions de souscription : soit à la collection entière, soit à un certain nombre de volumes.*

Les prix de SOUSCRIPTION *que nous indiquons sur le programme ci-contre représentent un maximum ; dans aucun cas ils ne pourront être dépassés pour les volumes demandés avant leur apparition. Ils seront, au contraire, diminués si le développement de la question traitée n'atteint pas le nombre de pages et de figures sur lesquelles nous avons basé ces prix.*

Avantages des souscriptions immédiates. — Toutefois nous nous réservons d'augmenter le prix de vente, suivant l'importance des ouvrages, pour les exemplaires qui nous seront demandés *après l'apparition des volumes ;* les nombreuses personnes susceptibles d'acquérir un, plusieurs ou l'ensemble des livres de notre Bibliothèque ont donc grand intérêt à nous adresser, dès maintenant, la liste des livres qu'elles désirent recevoir. Plus élevé sera le nombre des souscripteurs, plus grands seront les soins que nous apporterons, à la satisfaction de tous, dans l'exécution, plus parfaite encore, de nos éditions.

Souscription complète. — *Nous acceptons, dès à présent, des souscriptions à la collection entière, qui comprendra 73 volumes, au prix ferme de 590 francs, payables maintenant 20 francs tous les mois ou 60 francs par trimestre.* Ce prix réduit de 590 francs, représente une réduction de plus de 30 0/0 sur le prix des volumes achetés séparément.

Clients étrangers. — Nos clients étrangers, moins intéressés aux divers volumes traitant des questions de droit et d'administration, peuvent souscrire à la partie technique seule pour un prix ferme de 480 francs, payables 45 francs par trimestre. Les questions de droit et d'administration, 20 volumes, sont indiquées en caractères penchés sur le programme.

Souscription à 10 volumes. — La demande de 10 volumes parus ou à paraître, payables 15 francs par trimestre, au fur et à mesure de la réception des livres, donne droit à une réduction de 10 0/0 sur les prix forts marqués au programme.

Souscription à 20 volumes et au-dessus. — Pour 20 volumes et au-dessus, la réduction sera de 15 0/0, et le paiement de 10 francs par mois ou 30 francs par trimestre.

Souscription à une section. — Les prix de souscription de chacune des sections sont indiqués au programme et sont payables 15 francs par trimestre, après réception d'un ou plusieurs volumes.

Souscription à un ou plusieurs volumes. — Un ou plusieurs volumes divers souscrits avant l'apparition seront payables aux prix marqués en une ou plusieurs traites mensuelles ou trimestrielles, au fur et à mesure de l'envoi des livres.

Paiements. — *Les paiements ne seront jamais anticipés :* ils seraient suspendus jusqu'à l'apparition de nouveaux volumes, si le montant net des livres reçus était acquitté entièrement.

Expédition. — Les volumes parus sont expédiés de suite. Les volumes à paraître seront envoyés aussitôt parus.

EXTRAIT DE LA TABLE DES MATIÈRES

DES 56 VOLUMES PARUS

Vendus séparément aux prix indiqués et pouvant être payés en deux fois : la moitié un mois après la réception du volume, l'autre moitié trois mois après le premier versement.

(La Table complète des matières de chacun des volumes parus est envoyée gratuitement sur demande.)

MATHÉMATIQUES, par Georges Dariès, ingénieur de la Ville de Paris, licencié ès sciences mathematiques, 2e *édition*. Gr. in-16 de 550 pages, avec 310 fig..... 12 fr.

ANALYSE : Compléments d'algèbre. Calcul différentiel. Calcul intégral. Théorie des équations. GÉOMÉTRIE : Géométrie à deux dimensions. Calcul graphique. Géométrie à trois dimensions.

MÉCANIQUE, HYDRAULIQUE, THERMODYNAMIQUE, par Georges Dariès, ingénieur de la Ville de Paris, inspecteur adjoint de la distribution des eaux. 2e *édition*. Gr. in-16 de 804 pages avec 527 figures et 5 planches. 15 fr.

MÉCANIQUE RATIONNELLE : Cinématique. Statique. Dynamique. HYDRAULIQUE : Hydrostatique. Hydrodynamique. Orifices. Ajutages. Déversoirs. Tuyaux de conduite. Canaux et rivieres. Résistance des liquides. Mouvements ondulatoires. Écoulement souterrain. THERMODYNAMIQUE : Principes fondamentaux. Gaz parfaits. Vapeurs saturées. Ecoulement des gaz.

CHIMIE ET PHYSIQUE appliquées aux travaux publics (analyses et essais des matériaux de construction). par J. Malette, conducteur, chimiste à l'Ecole nationale des ponts et chaussées. *Edition modifiée*. Gr. in-16 de 619 pages avec 172 figures..... 12 fr.

RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE CHIMIE : Lois et principes. Opérations analytiques. Méthodes d'analyse. Réactifs. Classification des métaux. Réactions des corps. RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE PHYSIQUE : Propriétés de la matière. Pesanteur. Propriétés mécaniques des corps. Hydrostatique. Chaleur. Optique. Electricité. ANALYSE ET ESSAIS DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION : Pierres naturelles. Calcaires. Ardoises. Amendements. Terres. Sables. Bitumes. Asphaltes. Goudrons. Bois. Charbons. Chaux et ciments. Trass et pouzzolanes. Plâtres. Mortiers et bétons. Argiles. Briques et tuiles. Fers. Fontes et aciers. Cuivre. Alliages. Zinc. Blanc de zinc. Plomb. Céruse. Minium. Aluminium. Nickel. Verres. Eaux potables. Appendice.

RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX APPLIQUÉE AUX CONSTRUCTIONS. Méthodes pratiques par le calcul et la statique graphique, par E. Aragon, ingénieur des arts et manufactures.

Tome Ier : Gr. in-16 de 662 pages avec 387 fig..... 15 fr.

Préliminaires. Principes de statique graphique. Poutres droites à âme pleine sur deux appuis libres ou encastrés. Applications de la statique graphique dans l'étude des poutres posées sur deux appuis libres. Calculs complets de passerelles, de ponts pour voies de terre et de fer. Cahier des charges. Réglements.

Tome II : Gr. in-16 de 752 pages avec 370 figures..... 15 fr.

Poutres à travées solidaires. Arcs. Ponts suspendus. Piles métalliques. Assemblages des pièces et appareils d'appui. Accessoires divers et pièces de machines. Renseignements divers relatifs au calcul des ponts métalliques.

TOPOGRAPHIE appliquée aux travaux publics, par E. Prévot, conducteur des ponts et chaussées, faisant fonctions d'ingénieur au service du nivellement général de la France, suivi d'un Appendice relatif à la TOPOGRAPHIE EXPÉDIÉE, par O. Roux, conducteur des ponts et chaussées.

Tome Ier : Instruments. Gr. in-16 de 438 pages avec 272 fig. et 1 pl. 12 fr.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES : Notions élémentaires sur la théorie des erreurs. Etude de quelques organes d instruments. Mires et stadias. MESURE DES ANGLES : Mesure des angles horizontaux. Mesure des angles verticaux. MESURE DES DISTANCES : Mesure directe des distances. Stadimétrie ou mesure indirecte des distances. Principe de la stadimétrie et généralités. MESURE DES ANGLES OU NIVELLEMENT : Nivellement direct ou géométrique. Nivellement trigonométrique. Nivellement barométrique. MESURE SIMULTANÉE DES ANGLES VERTICAUX, DES ANGLES HORIZONTAUX ET DES DISTANCES : Mesure simultanée des angles horizontaux et verticaux. Théodolites. Mesure simultanée des angles et des distances. Tacheomètres. INSTRUMENTS SPÉCIAUX AUX LEVERS SOUTERRAINS. INSTRUMENTS DE TOPOGRAPHIE EXPÉDIÉS.

Tome II : Méthodes. Gr. in-16 de 572 pages avec 262 fig. et 5 pl. dont 4 en couleurs..... 15 fr.

ETUDE GÉNÉRALE DES MÉTHODES : Généralités. Effets de la courbure de la terre. Méthodes fondamentales de levé relatives à la planimétrie. Méthodes fondamentales de levé relatives au nivellement. Méthodes appropriées aux instruments et particularités d'emploi de ces derniers. Règles générales qui président à l'application des méthodes fondamentales aux levés étendus. Canevas et détails.

RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS D'ASTRONOMIE ET DE GÉODÉSIE : Applications topographiques de l'astronomie. Détermination de la méridienne. Géodésie. Triangulation.

APPLICATIONS : Levé des plans d'études. Levé de plans parcellaires et cadastraux. Nivellement général de la France. Levés souterrains. Liste des modèles de tableaux de calculs, avec exemples numériques.

LEVÉS EXPÉDIÉS. LEVÉS SPÉCIAUX : Etude du terrain. Application des méthodes et des instruments aux divers genres de levé. Le dessin topographique. Lecture et emploi des cartes topographiques.

MAÇONNERIES, par Eugène Simonet, conducteur des ponts et chaussées, attaché au service municipal de la Ville de Paris. Gr. in-16 de 442 pages avec 102 fig..... 10 fr.

PIERRES NATURELLES : Granits et porphyres. Roches volcaniques. Schistes. Grès. Silex. Meulières. Pierres calcaires. Marbres. Résistance des pierres. Travail des pierres : *sciage, taille, machines à travailler la pierre.*

PIERRES ARTIFICIELLES : Argiles. Marne. Briques : *ordinaires, réfractaires, briques légères réfractaires, creuses, vernissées.* CHAUX. CIMENTS. MORTIERS : Pierres calcaires. Chaux. Chaux hydrauliques artificielles. Ciments. Pouzzolanes. Laitiers. Analyse chimique : *pierres, chaux, ciments.* Mortiers : *description, résistance.* Plâtre. MAÇONNERIES : Maçonnerie : *de pierre, moellons, meulière, brique.* Construction en fer et ciment. Ciment métallique. Bitume et asphaltes.

APPENDICE : Devis et cahier des charges. Tableaux des principaux granits, porphyres, pierres volcaniques, grès français et pierres calcaires de France.

BOIS ET MÉTAUX, par E. Aucamus, ingénieur des arts et manufactures, attaché au service du matériel et de la traction des chemins de fer du Nord. Gr. in-16 de 335 pages avec 288 fig..... 8 fr.

BOIS : Classification des bois. Qualités et défauts. Préparation des bois. Assemblages. Machines-outils. Résistance et essais des bois. MÉTAUX : Notions générales de métallurgie. Fer. Fonte. Acier. Fabrication des fers spéciaux et des tôles. Travail des métaux. Machines-outils. Assemblages divers. Rivure. Essai et résistance des métaux.

TRACÉ ET TERRASSEMENTS, par P. Frick, ingénieur des constructions civiles, chevalier du Mérite agricole, et J.-L. Canaud, conducteur des ponts et chaussées, chef de section des chemins de fer. Gr. in-16 de 669 pages, avec 317 fig..... 15 fr.

TRACÉ : Considérations générales. Etude et détermination d'un tracé. Comparaison des tracés. Détermination définitive du plan et du profil en long. Cubature des terrasses. Calcul des profils en travers. Mouvement des terres.

EXÉCUTION DES TERRASSEMENTS : Mode d'exécution des déblais ou remblais : *Des sondages. Des déblais. Des remblais.* Transports. Organisation d'un chantier de terrassements : *Chantiers à la brouette, au tombereau, aux wagonnets, aux wagonnets avec traction par chevaux, aux grands wagons sur voie de 1 mètre, de déchargement; exécution des remblais.* Assainissements. Drainages. Réparations : Assainissements et drainage des tranchées : *Des*

talus de déblais. Murs de soutènement divers. Précautions à prendre dans l'exécution des remblais. Réparations des éboulements. Entretien des terrassements. ANNEXES : Note sur la pratique des opérations sur le terrain. Note sur les méthodes nord-américaines de terrassements. Note sur les courbes de raccordements. Note sur les raccordements paraboliques. Formules relatives aux principaux cas de raccordements. APPENDICE : Note sur la présentation des projets.

FOUILLES ET FONDATIONS, par P. Frick, ingénieur des constructions civiles. In-16 12 × 18 de 500 pages, avec 350 figures..... 12 fr.

GÉNÉRALITÉS. SONDAGES. *Première partie :* FOUILLES ET FONDATIONS A L'AIR LIBRE. Fondations par fouilles directes jusqu'au solide. Asséchements des fouilles. Epuisements. Procédés divers d'assèchement. Fondations sur supports discontinus. Pieux et pilotis. Puits. Havage. Cas spéciaux. *Deuxième partie :* FOUILLES ET FONDATIONS SOUS L'EAU. Fouilles sous l'eau. Dragage. Dérochements. Batardeaux. Caissons. Fondations sous l'eau. Béton immergé. Radiers généraux. Pilotis. Havage. *Troisième partie :* AIR COMPRIMÉ. Cloches. Scaphandres. Fondations par caissons à air comprimé. Caissons particuliers, amovibles, mobiles, en maçonnerie. Effets physiologiques de l'air comprimé, mesures hygiéniques. Déblais souterrains. Tunnels. Modes d'exécution. Procédés spéciaux. Tunnels en terrains difficiles. Accidents.

Annexe : LE BÉTON ARMÉ. Généralités. Méthodes de calculs. Divers systèmes. Applications. Métal déployé.

DROIT CIVIL, par Louis Martin, avocat, professeur libre de droit. Gr. in-16 de 500 pages ..... 8 fr.

INTRODUCTION : Notions générales.

DES PERSONNES : De la jouissance et de la privation des droits civils. Des actes de l'état civil. Du domicile. De l'absence. Du mariage. Du divorce. De la paternité et de la filiation. De l'adoption. De la puissance paternelle. Minorité. Tutelle. Emancipation. De la majorité. De l'interdiction et du conseil judiciaire.

DES BIENS : De la distinction des biens. De la propriété, de l'usufruit, de l'usage et de l'habitation. Des servitudes ou services fonciers.

DES DIFFÉRENTES MANIÈRES DONT ON ACQUIERT LA PROPRIÉTÉ : Des successions. Des donations entre vifs et des testaments. Des contrats ou des obligations conventionnelles. Des engagements qui se forment sans convention. Du contrat de mariage et des droits respectifs des époux. De la vente. De l'échange. Du contrat de louage. Du contrat de société. Du prêt. Du dépôt et du séquestre. Des contrats aléatoires. Du mandat. Du cautionnement. Des transactions. De la contrainte par corps. Du nantissement. Des privilèges et hypothèques. De la prescription.

DROIT ADMINISTRATIF, par Paul Touzac, licencié en droit, rédacteur au Ministère des Travaux publics. Gr. in-16 de 511 pages..... 9 fr.

NOTIONS GÉNÉRALES DE DROIT POLITIQUE OU CONSTITUTIONNEL : Les droits de l'homme et du citoyen. Organisation des pouvoirs publics, pouvoir législatif, pouvoir exécutif. DROIT ADMINISTRATIF : L'Etat. Le département. L'arrondissement. La commune. Le département de la Seine et les villes de Paris et de Lyon. L'Algérie, les colonies et les pays de protectorat. Les établissements publics et d'utilité publique. Indépendance de l'autorité administrative à l'égard de l'autorité judiciaire.

DROIT COMMERCIAL ET LÉGISLATION INDUSTRIELLE, par L. Martin, professeur libre de droit, membre de la Chambre des députés. Gr. in-16 de 671 pages ..... 10 fr.

DROIT COMMERCIAL. DU COMMERCE EN GÉNÉRAL : Des commerçants. Des livres de commerce. Des sociétés. Des séparations de biens. Des bourses de commerce, agents de change et courtiers. Du gage et des commissionnaires. Des ventes et achats. De la lettre de change, du billet à ordre et de la prescription.

DU COMMERCE MARITIME : Des navires et autres bâtiments de mer. De la saisie et vente des navires. Des propriétaires de navires. Du capitaine. De l'engagement et des loyers des matelots et gens de l'équipage. Des chartres parties, affrètements ou nolisements. Du connaissement. Du fret ou nolis. Des contrats à la grosse. Des assurances. Des avaries. Du jet et de la contribution. Des prescriptions. Fins de non-recevoir.

DES FAILLITES ET DES BANQUEROUTES ET DES LIQUIDATIONS JUDICIAIRES : De la faillite. Des ban-

queroutes. De la réhabilitation. De la liquidation judiciaire. Juridiction commerciale. De l'organisation des tribunaux de commerce. Compétence et forme de proceder. Des conseils de prud'hommes.

Législation industrielle : Législation du travail. Des contrats industriels. La propriété industrielle : *Brevets d'invention, marques de fabrique, contrefaçon, secrets de fabrication, concurrence déloyale, propriété littéraire et artistique.* Loi du 9 avril 1898 sur la responsabilité des accidents du travail.

PROCÉDURE CIVILE ET DROIT PÉNAL, par L. Martin, avocat, professeur libre de droit. Gr. in-16 de 452 pages..... 8 fr.

Procédure civile : Organisation judiciaire. Procédure devant les tribunaux. Procédures diverses.

Droit pénal. Code pénal : Dispositions préliminaires. Des peines en matière criminelle et correctionnelle et de leurs effets. Des personnes punissables, excusables ou responsables pour crimes et délits. Des crimes et délits et de leur punition. Contravention de police.

Instruction criminelle : Code. Dispositions préliminaires. De la police judiciaire et des officiers de police qui l'exercent. De la justice.

EXÉCUTION DES TRAVAUX PUBLICS, par E. Dardart, conducteur principal des ponts et chaussées. Gr. in-16 de 632 pages..... 12 fr.

Des travaux publics au point de vue des finances publiques : Notions générales sur la comptabilité publique. Travaux exécutés : *sur les fonds de l'Etat, des départements, communaux.* Règlement général sur la comptabilité publique. Division des travaux publics. Dépenses des travaux publics.

Du mode d'exécution des travaux publics : Notions générales. Les marchés ou entreprises de travaux publics. Des rapports de l'Administration avec les propriétaires à l'occasion des travaux publics. Annexes : Ordonnances. Décrets. Instructions, etc.

ORGANISATION DES SERVICES DE TRAVAUX PUBLICS en France, par E. Campredon, ingénieur civil des mines. Gr. in-16 de 416 pages. 8 fr.

Service des Ponts et Chaussées : Etude historique, organisation du personnel. Fonctions. Mode de procéder. Tenue des bureaux.

Service des Mines : Etude historique. Organisation du personnel. Fonctions. Mode de procéder. Tenue des bureaux.

Service des Chemins de fer : Etude historique. Organisation du personnel. Fonctions. Mode de procéder et tenue des bureaux. Service des chemins de fer de l'Etat.

Services d'intérêt collectif : Service départemental. Service communal. Service de la ville de Paris. Services des associations syndicales. Services des autres travaux d'intérêt public.

Services auxiliaires : Service colonial. Service du Ministère de l'Instruction publique, des Beaux-Arts et des Cultes. Service du Ministère de l'Agriculture. Services des Ministères de la Guerre et de la Marine. Service du Ministère de l'Intérieur. Service du Ministère du Commerce, de l'Industrie, des Postes et Télégraphes. Service du Ministère des Finances.

COMPTABILITÉ DES TRAVAUX PUBLICS et tenue des bureaux des services de ponts et chaussées, par E. Herbert, ex-conducteur des ponts et chaussées, secrétaire-régisseur de l'Ecole nationale des mines. Préface de M. L. Durand-Claye, inspecteur général des ponts et chaussées en retraite. Gr. in-16 de 520 pages..... 12 fr.

Règlement provisoire de 1878 sur la comptabilité des dépenses du Ministère des Travaux publics et nomenclature des pièces à produire aux trésoriers-payeurs généraux pour le paiement des dépenses du Ministère, mis à jour au 1er janvier 1898. Lois et règlement sur le timbre de l'enregistrement. Règlement spécial de 1849 sur la comptabilité du Ministère des Travaux publics, mis à jour au 1er janvier 1898. Frais divers de services. Instruction de 1879 sur la tenue des bureaux des services des Ponts et Chaussées, mis à jour au 1er janvier 1898. Comptabilité des services d'architecture et des promenades et plantations de la Ville de Paris. Retraites des cantonniers de l'Etat. Secours aux ouvriers blessés. Table des documents par ordre chronologique. Table des matières par ordre alphabétique. Table des modèles de formules annexes aux divers règlements. Table de concordance entre les règlements de 1843, 1849 et 1878.

COMPTABILITÉ DÉPARTEMENTALE, VICINALE, COMMUNALE ET COMMERCIALE, par E. Dardart, sous-ingénieur des ponts et chaussées, A. Bonnal, ingénieur civil, et Ch. Orrier, expert comptable. In-16 12 × 18 de 778 pages..... ..... 12 fr.

COMPTABILITÉ DÉPARTEMENTALE. Introduction. Disposition générale. Du budget et des crédits. Recettes budgétaires. Dépenses budgétaires. Des écritures du Préfet. Des écritures du Trésorier-Payeur général. Des comptes du département. Conservation du mobilier départemental. Dispositions finales. Nomenclature des pièces et des justifications à produire. *Service hors budget. Comptabilité des recettes et des dépenses de la Ville de Paris.*

COMPTABILITÉ DES CHEMINS VICINAUX. Généralités. Création et répartition des ressources. Exécution des travaux. Comptabilité : de l'agent voyer cantonal ; du régisseur comptable ; de l'agent voyer en chef ; du Maire ; du receveur municipal. Justification des recettes et des dépenses. Comptabilité : du Préfet, du Trésorier-Payeur général. Inventaire. Législation. *Chemins vicinaux du département de la Seine.*

COMPTABILITÉ DES CHEMINS RURAUX. Législation. Règlement général. Comptabilité : du Maire ; des receveurs municipaux. Justification.

COMPTABILITÉ COMMUNALE. Du budget. Enumération et classement des charges et des ressources financières des communes. Ressources dont les communes ne peuvent bénéficier sans l'agrément de l'autorité supérieure. Du receveur municipal. Recouvrement des produits. Quittances. Non-valeurs. Emploi des crédits. Liquidation et ordonnancement. Ecritures du Maire. Comptabilités occultes. *Annexes diverses.*

COMPTABILITÉ COMMERCIALE. Généralités. Différents genres de commerces et d'industries. Comptes. Actes de commerce. Formes à donner à la comptabilité. Modèles de réglures des livres. *Participation aux bénéfices :* Comment on doit l'entendre. Participation intégrale. Participation limitée. Participants. Contrats ou conventions de participation.

ROLE ÉCONOMIQUE ET SOCIAL DES VOIES DE COMMUNICATION, par E. Campredon, ingénieur civil des mines, inspecteur départemental du travail dans l'industrie. Gr. in-16 de 515 pages ..... 10 fr.

LE RÔLE ÉCONOMIQUE DES VOIES DE COMMUNICATION : Les routes. Les voies ferrées. Les voies navigables. Les voies maritimes. Les voies électriques.

LE RÔLE SOCIAL DES VOIES DE COMMUNICATION.

RAPPORTS DE SERVICE, par A. Dardart, sous-ingénieur des ponts et chaussées en retraite, et Ph. Dufour, commis principal des ponts et chaussées, lauréat de l'Académie française ; et **STÉNOGRAPHIE,** par Zryd, conducteur des ponts et chaussées, professeur. Gr. in-16 de 716 p. avec fig. 12 fr.

Rapports et style en général. Mots et images. Phrases et figures. Considérations générales sur les langues et les mots. Archaïsmes. Synonymes. Solécismes. Citations latines et étrangères. Homonymes. Paronymes. Verbes. Ponctuation. Orthographe. Liaisons. Logique. Morale. Disposition extérieure d'un rapport. Documents, discours et rapport. — *Sténographie, Dactylographie, Langues universelles.*

HYGIÈNE et secours et premiers soins à donner aux malades et aux blessés, par le docteur J. Noir, professeur des Ecoles municipales d'infirmières de la Ville de Paris. Gr. in-16 de 320 pages avec 79 fig..... 7 fr. 50

Hygiène générale. Les milieux naturels : *L'atmosphère, sa composition, ses propriétés. Le sol, l'eau, les climats.* Les milieux artificiels : *L'habitation. Les vêtements.* Alimentation : *Aliments solides, les boissons, art culinaire.* Hygiène du corps : *Soins de propreté corporelle, Hydrothérapie, travail physique et intellectuel, gymnastique, sports, surmenages.* Hygiène publique. Hygiène industrielle et professionnelle : *Le milieu industriel, les dangers des matières mises en œuvre, influence de l'outillage sur l'ouvrier et dangers auxquels il expose, hygiène du bureau.* Secours et premiers soins à donner en cas d'accidents aux malades et aux blessés. Le corps humain et ses diverses fonctions, soins et secours urgents, secours et soins aux blessés.

ROUTES ET CHEMINS VICINAUX, par O. Roux, conducteur des ponts et chaussées. Gr. in-16 de 575 pages avec 275 fig..... 12 fr.

CLASSIFICATION DES VOIES DE TERRE : Dénomination des différentes voies. Etude sommaire de leurs diverses parties. Statistique.

Période des études : Tracé. Rédaction de l'avant-projet. Rédaction du projet définitif.

Travaux neufs et d'entretien : Piquetage. Terrassements. Chaussées. Les cantonniers. Plantations. Le budget des routes.

Chemins vicinaux : Ressources et budgets. Les prestations. Le budget communal. Le budget départemental. Notes sur le cheval et la voiture.

VOIE PUBLIQUE, par Georges Lefebvre, conducteur des ponts et chaussées, attaché au service municipal de la voie publique et du nettoiement de la ville de Paris. Gr. in-16 de 520 pages avec 140 fig..... 12 fr.

Généralités : Tracé, alignements. Chaussées pavées en pierre. Chaussées en empierrement. Chaussées en asphalte comprimé. Chaussées pavées en bois. Chaussées mixtes et diverses. Trottoirs et contre-allees. Travaux de viabilité. Nettoiement, arrosement et enlèvement des neiges et glaces. Pratique du service.

DISTRIBUTIONS D'EAU, par G. Dariès, conducteur au service des Eaux de Paris, licencié ès sciences, professeur d'hydraulique à l'Ecole spéciale des travaux publics. Gr. in-16 de 566 pages avec 400 fig..... 15 fr.

Généralités. De la qualité des eaux. Eaux souterraines. Consommation. Puisage et captation des eaux. Adduction des eaux. Procédés de filtrage et d'épuration. Machines élévatoires. Réservoirs. Conduites de distribution. Appareils publics. Service dans la maison. Entretien des canalisations. Exploitation. Vente de l eau. Annexes.

ASSAINISSEMENT DES VILLES ET ÉGOUTS DE PARIS, par Paul Wéry, chef du bureau du service des égouts. Gr. in-16 de 663 pages avec 434 fig..... 18 fr.

Assainissement des villes : Evacuation des eaux. Réservoirs de vidange. Canalisations spéciales. Système fonctionnant par simple gravitation. Système dit tout à l'égout. Projet d'assainissement d'une ville par le système du tout à l'égout. Entretien du réseau d'égouts et de canalisations. Extension du service de la distribution d'eau. De la salubrité des voies publiques. Utilisation agricole des eaux d'égouts. Prix composés applicables à la construction des égouts, canalisations, branchements de regards et de bouche, et réservoirs de chasse. Assainissement de l'habitation par le tout à l'égout. Devis estimatifs et types divers d'assainissement de maisons. De l'assainissement dans certaines villes de France et de l'étranger. Assainissement de la Seine. Devis et cahier des charges, bordereau de l'entreprise des travaux de maçonnerie, charpente, etc., du service d'assainissement.

Les egouts de Paris : Historique. Description du réseau d'égouts parisiens. Collecteur de Clichy et siphon de la Concorde. Profil des égouts. Ouvrages accessoires des égouts. De l'exploitation des égouts.

PLANTATIONS D'ALIGNEMENT, PROMENADES, PARCS ET JARDINS PUBLICS, par G. Lefebvre, conducteur des ponts et chaussées, chef de circonscription des services techniques municipaux de la Ville de Paris. Grand in-16 de 357 pages avec 336 fig. et 1 pl..... 11 fr.

Introduction : Règne végétal.

Plantations d'alignement : Dispositions des plantations et choix des essences. Exécution des plantations. Entretien des plantations. Maladies des plantations d'alignement. Renseignements statistiques.

Promenades et jardins publics : L'art du dessinateur de jardins. Etude des projets de parcs et jardins publics. Construction d'un parc ou jardin public. Entretien des parcs et jardins publics. Projet de jardin public.

Appendice : Pratique du service. Devis et cahier des charges de l'entreprise de transplantation d'arbres au chariot. Entreprise des travaux relatifs à l'irrigation et au drainage des plantations, à la pose des grilles d'arbres et des bancs. Cahier des charges et bordereau des prix pour les travaux neufs et d'entretien à exécuter aux plantations d'alignement et promenades de Paris, ainsi qu'aux bois de Boulogne et de Vincennes.

ÉCLAIRAGE, par B. Saint-Paul, conducteur municipal, chef du service technique de l'éclairage de la 1re section de la Ville de Paris, et L. Galine, ingénieur des arts et manufactures. *2e édition.* Gr. in-16 de 697 pages avec 308 fig..... 15 fr.

ECLAIRAGE AUX HUILES VÉGÉTALE ET MINÉRALES : Eclairage à l'huile végétale : *Fabrication de l'huile. Lampes à l'huile.* Traitement des huiles minérales : *Exploitation des gisements. Raffinage de l'huile minérale.* Eclairage aux huiles minérales : *Eclairage a l'essence. Lampes au pétrole. Eclairage aux huiles lourdes.*

ECLAIRAGE AU GAZ : Distillation de la houille : *Production du gaz. Sous-produits.* Distribution du gaz. Brûleurs : *à air libre, intensifs à air froid, à air chaud, à incandescence, à gaz carburé. Appareils de réglage.* Eclairage privé et public. Gaz spéciaux : acétylène, gaz riche, gaz de bois, gaz à l'eau, gaz à l'air.

ECLAIRAGE ÉLECTRIQUE : Arc voltaïque et incandescence. *Production de l'arc, régulateurs, bougies électriques, lampes à incandescence.* Montage des lampes. Photométrie. Projets d'éclairage : *gaz, électricité.*

LÉGISLATION DES EAUX, par L. Courcelle, avocat, et E. Dardart, sous-ingénieur des ponts et chaussées. Gr. in-16 de 954 pages..... 15 fr.

Eaux pluviales, sources, eaux souterraines. Rivières flottables à bûches perdues. Cours d'eau navigables ou flottables par trains ou radeaux. Canaux de navigation. Irrigation. Alimentation en eaux des communes. Travaux de défense contre les eaux, endiguements. Etangs et marais. Mer territoriale et rivages de la mer. Ports maritimes de commerce. Eclairage et balisage des côtes. Marine marchande. DOCUMENTS LÉGISLATIFS, ADMINISTRATIFS ET JUDICIAIRES.

CHEMINS DE FER, CONSTRUCTION ET VOIE, par A. Sirot, conducteur principal des ponts et chaussées, ancien chef de section aux chemins de fer de l'Etat. Gr. in-16 de 495 pages avec 270 fig. et 12 pl..... 12 fr. 50

ETUDES : Etudes préliminaires : *Enquête d'utilité publique, avant-projet.* Etudes définitives : *Projet de tracé et de terrassements, projet définitif. Avant-métré.*

CONSTRUCTION. INFRASTRUCTURE : Plate-forme : *Terrassements, consolidation des talus.* Ouvrages d'art : *Ouvrages d'art ordinaires, ouvrages pour assurer l'écoulement des eaux, ouvrages pour le maintien des voies de communication, grands ponts et viaducs, souterrains, accidents sur les chantiers.* Dépense kilométrique de l'infrastructure de diverses lignes.

SUPERSTRUCTURE : Voie : Rails, *traverses, accessoires de la voie, changements de voies, croisements de voie, plaques tournantes, chariots transbordeurs, alimentation en eau des machines, fosse à piquer le feu, signaux, prix de revient des appareils de la voie.* Gares et stations : *Dispositions et accessoires des gares, service des marchandises.* Entretien et surveillance : Prescriptions de grande voirie.

CHEMINS DE FER. LOCOMOTIVE ET MATÉRIEL ROULANT, par Maurice Demoulin, ingénieur des arts et manufactures. Gr. in-16 de 402 pages avec 215 fig. et 11 pl..... 12 fr.

LA LOCOMOTIVE : Considérations générales. La chaudière. Le mécanisme. Le véhicule. Le tender et la locomotive-tender. Principaux types de locomotives. Description de quelques locomotives de construction récente. Les locomotives compound.

LE MATÉRIEL ROULANT : Considérations générales. Construction des voitures et wagons. Description de quelques types de voitures. Freins.

EXPLOITATION TECHNIQUE DES CHEMINS DE FER, par L. Galine, ingénieur des arts et manufactures, inspecteur à la Compagnie des chemins de fer du Nord. Gr. in-16 de 704 pages avec 309 fig..... 16 fr.

AMÉNAGEMENT DES GARES : Service des voyageurs. Service des marchandises. Construction. SIGNAUX : Code des signaux. Construction. Concentration des leviers. Enclenchements. MOUVEMENT DES TRAINS : Marche des trains. Block-system. Voie unique. Vitesse des trains. PRATIQUE DU SERVICE : Exploitation. Matériel et traction. Matériel. Voie.

TRAMWAYS ET AUTOMOBILES, par E. Aucamus, ingénieur des arts et manufactures, chef d'atelier à la Compagnie des chemins de fer du Nord, et L. Galine, ingénieur des arts et manufactures, inspecteur à la Compagnie des chemins de fer du Nord. Gr. in-16 de 481 pages, avec 234 fig..... 12 fr.

TRAMWAYS : Résistance à la traction. Voie. Matériel et traction. Tramways où l'énergie est produite directement sur le véhicule : *à traction animale, à vapeur, chemins de fer à cre-*

maillère. Tramways où l'énergie provenant d'une usine centrale est fournie à chaque instant par des câbles ou conducteurs : *Tramways funiculaires, tramways électriques par câbles*. L'énergie produite dans une usine centrale est emmagasinée dans les véhicules pour un certain parcours : *Traction par accumulateurs électriques, locomotives sans foyer, traction par l'air comprimé, tramways à gaz, systèmes divers*.

Automobiles : Classification. Résistance. Construction des automobiles. Moteurs. Automobiles à pétrole : *Moteurs à pétrole, voitures ordinaires et voitures lourdes. Motocycles et voiturettes*. Automobiles à vapeur. Automobiles électriques. Annexes : Règlements, circulaires, etc.

CONTROLE DES CHEMINS DE FER ET DES TRAMWAYS, par J. de La Ruelle, avocat, rédacteur au Ministère des Travaux publics. Gr. in-16 de 733 pages..... 12 fr.

Caractères généraux du droit de contrôle de l'Etat : Sa nature. Sa raison d'être. Son origine. Organisation du contrôle de l'Etat sur les chemins de fer : Contrôle de la construction. Contrôle de l'exploitation. Rôle et attributions des différents fonctionnaires du contrôle : Administration centrale : *Ministère des Travaux publics, préfets*. Contrôle technique : *Directeur, ingénieur en chef et ingénieurs des ponts et chaussées et des mines, conducteurs, contrôleurs et commis*. Contrôle commercial : *Directeur, contrôleur général, inspecteurs principaux et particuliers*. Contrôle technique et commercial. Police : *Commissaires de surveillance et commissaires spéciaux*. Contrôle du travail : *Ingénieurs en chef et ingénieurs des ponts et chaussées et des mines, contrôleurs du travail, comités du travail du réseau de l'Etat*. Exercice du droit de contrôle. Tenue des bureaux. Utilité du contrôle financier, son organisation. Conseils, comités et commissions institués auprès du ministère des travaux publics et ayant des attributions en matière de chemins de fer. Chemins de fer de l'Etat. Chemins de fer d'intérêt local et tramways. Lignes diverses : Contrôle des chemins de fer d'intérêt local et des tramways. Contrôle des chemins de fer miniers et des chemins de fer industriels. Contrôle des voies ferrées des quais des ports maritimes et fluviaux. Réseaux algériens et tunisiens : Organisation du contrôle des voies ferrées.

Personnel du contrôle : Recrutement du personnel spécialisé. Renseignements divers : Positions diverses. Traitements et allocations. Retraites. Uniforme. Annexes : Lois, décrets, arrêtés, ordonnances, etc.

GÉOLOGIE ET MINÉRALOGIE APPLIQUÉES. Les minéraux utiles et leurs gisements, par H. Charpentier, ingénieur civil des mines. Gr. in-16 de 643 pages avec 115 fig..... 12 fr.

Précis de géologie générale avec éléments de minéralogie et de paléontologie. Phénomènes actuels. Formation de l'écorce terrestre. Chronologie géologique.

Géologie appliquée proprement dite : Considérations générales. Etude d'un gisement. Matériaux de construction et roches employées dans les travaux publics. Minéraux employés dans la métallurgie. Le carbone et ses composés. Combustibles minéraux et hydrocarbures. Minéraux employés en agriculture. Minéraux employés dans les industries diverses. Métaux rares. Pierres précieuses, gemmes.

EXPLOITATION DES MINES, par Félix Colomer, ingénieur civil des mines. 2e *édition*. Gr. in-16 de 344 pages avec 176 fig..... 9 fr.

Mise en exploitation : Exploitations faciles. Sondages. Aménagement du gîte. Méthode d'exploitation.

Extraction du minerai : Abatage. Roulage. Extraction.

Services généraux d'une exploitation : Epuisement des eaux. Aérage. Installations extérieures. Prix de revient. Avant-projet de puits de mine.

CHAUDIÈRES A VAPEUR, par J. Dejust, ingénieur des arts et manufactures, répétiteur à l'Ecole centrale, professeur à la Fédération des mécaniciens et chauffeurs. Gr. in-16 de 562 pages avec 394 fig. et 2 pl ..... 12 fr.

Introduction. Généralités. Production de la chaleur : Formation et propriétés de la vapeur d'eau. Combustion et combustibles. Foyers. Chaudières a vapeur : Généralités. Classification et étude des divers types de chaudières. Etablissement des chaudières.

Organes accessoires des chaudières : Appareils de sûreté. Appareils annexes. Divers : Accidents et explosions de chaudières. Conduite et entretien des chaudières. Transport de la vapeur : Généralités. Détails des canalisations. Appareils accessoires des canalisations. Calcul

du diamètre des canalisations. Concours pour construction et installations de générateurs. Calcul des dimensions d'une chaudière.

MACHINES A VAPEUR et machines thermiques diverses, par J. Dejust, ingénieur des arts et manufactures, répétiteur à l'Ecole centrale, professeur à la fédération des mécaniciens et chauffeurs. Gr. in-16 de 600 pages avec 407 fig..... 15 fr.

Généralités sur les machines thermiques : *Historique, application de la thermodynamique.* MACHINES A VAPEUR : Classification. Fonctionnement d'une machine à vapeur à mouvement alternatif. Détermination des dimensions. Organes de la machine à vapeur à mouvement alternatif et à cylindre unique. Etude des divers systèmes de distribution et de détente des machines à cylindre unique. Distribution et détente dans les machines à plusieurs cylindres. Condensation de la vapeur. Classification et étude des machines à piston et à mouvement alternatif au point de vue du genre de travail qu'elles ont à produire. Rendement, comparaison et choix des machines. Machines oscillantes. Machines rotatives. Machines sans piston et à pression directe. Machines où la vapeur agit par sa puissance vive.

MACHINES THERMIQUES employant un autre intermédiaire que la vapeur. Moteurs à air chaud. Moteurs à gaz. Moteurs à pétrole. Machines thermiques diverses. Achat, installation, réception et entretien des machines thermiques.

MACHINES HYDRAULIQUES, par F. Chaudy, ingénieur des arts et manufactures. Gr. in-16 de 402 pages avec 300 fig..... 10 fr.

RÉCEPTEURS HYDRAULIQUES : Chutes d'eau. Turbines. Considérations générales. Roues. Etablissement des turbines et des roues hydrauliques. Machines à colonne d'eau. Bélier hydraulique. MACHINES ÉLÉVATOIRES : Pompes à piston à mouvement alternatif. Pompes à piston rotatif. Pompes centrifuges. Machines élévatoires diverses.

PROPULSEURS HYDRAULIQUES : Roues à aubes. Hélices. *Presses hydrauliques* : Considérations générales. Presses verticales. Presses horizontales Cockerill. Observations et appareils divers basés sur la presse hydraulique. Applications de la presse hydraulique au travail des métaux.

LÉGISLATION MINIÈRE ET CONTROLE DES MINES, par Cuvillier, contrôleur principal des mines. Gr. in-16 de 778 pages..... 12 fr.

RÉGIME LÉGAL DE LA PROPRIÉTÉ DES MINES : Conception de la propriété des mines. Historique. Classification legale des substances minérales. Recherche de mines. Obtention des concessions. Recours et interprétation des actes de concession. Devoirs des concessionnaires : *vis-à-vis des inventeurs, des explorateurs, des propriétaires du sol, envers l'Etat.* Droits des concessionnaires. RÉGIME DE L'EXPLOITATION. CONTRÔLE : Surveillance administrative de l'exploitation des mines. Anciennes concessions. Mines de sel. Mines et minières de fer. Terres pyriteuses et alumineuses. Usines métallurgiques. Tourbières. Carrières. Juridiction et pénalités. Personnel occupé dans les exploitations minérales. Personnel de l'administration des mines.

DOCUMENTS LÉGISLATIFS SUR LES MINES, MINIÈRES ET CARRIÈRES : Législation de la métropole. Législation coloniale.

LÉGISLATION ET CONTROLE DES APPAREILS A VAPEUR, par T. Cuvillier, contrôleur principal des mines. Gr. in-16 de 388 pages..... 8 fr.

LÉGISLATION ACTUELLE DES APPAREILS A VAPEUR : Dispositions pénales. Règlements d'administration publique : Appareils à vapeur fonctionnant sur terre et sur l'eau, statistique générale des appareils à vapeur en 1895. CONTROLE DES APPAREILS A VAPEUR : Personnel chargé en France du contrôle des appareils à vapeur. Nature du contrôle exercé. Attributions ordinaires et service courant des contrôleurs des mines. Appendice : Renseignements d'ordre technique, législatif et social.

ARCHITECTURE, par Albert Hébrard, architecte diplômé par le gouvernement, sous-inspecteur au palais des beaux-arts. Gr. in-16 de 434 pages avec 371 fig..... 15 fr.

ETUDE ANALYTIQUE DES DIVERS ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION ET DE DÉCORATION : Fondations. Murs. Supports isolés avec entablement. Arcades. Bases, couronnement et saillies des murs. Percement des murs : *portes et fenêtres*. Plafonds et voûtes. Escaliers, cheminées et revê-

tement des sols. Couvertures. Composition des édifices : Principes généraux de la composition. Principales parties des édifices. Hygiène des édifices. Exécution des travaux : Organisation du chantier. Direction et surveillance des travaux.

CHARPENTE ET COUVERTURE, par E. Aldebert, ingénieur des arts et manufactures, agent voyer cantonal, et E. Aucamus, ingénieur des arts et manufactures, sous-chef d'atelier à la Compagnie du Nord. Gr. in-16 de 370 pages avec 421 fig..... 10 fr.

Charpentes en bois : Des bois. Des assemblages. Planchers en bois. Pans de bois. Escaliers. Des combles. Etais et échafaudages.

Charpentes en fer : Travail du fer. Des assemblages. Des planches en fer. Pans de fer, poteaux et colonnes. Escaliers en fer. Combles métalliques.

Couverture des bâtiments : Matériaux et leur emploi. Couverture en tuiles. Couverture en ardoise. Couverture en verre. Couverture en zinc, en tôle ondulée, en plomb et en cuivre. Chéneaux et gouttières.

Annexe : Extrait du règlement sur la hauteur des maisons dans la Ville de Paris.

MENUISERIE, SERRURERIE, PLOMBERIE, PEINTURE ET VITRERIE, par E. Aucamus, ingénieur des arts et manufactures, sous-chef d'atelier à la Compagnie du Nord. Gr. in-16 de 352 pages avec 204 fig..... 10 fr.

Menuiserie : Généralités : *Définitions, matériaux, quincaillerie, outillage de menuisier, assemblages, moulures, établissement des bois.* Menuiserie du bâtiment : Classification, lambris, portes, croisées, persiennes, échelles et escaliers. Parquets. Extraits d'un devis et cahier des charges. Nomenclature et explication des termes techniques de menuiserie.

Serrurerie : Généralités. Chaînages. Ferrements de menuiserie. Serrures. Clôtures et ouvrages divers. Extrait d'un cahier des charges. Nomenclature et explication des principaux termes techniques de menuiserie.

Plomberie : Généralités. Outillage. Soudures. Plomberie du bâtiment. Extrait d'un devis et cahier des charges. Nomenclature et explication des principaux termes techniques de plomberie.

Peinture : Généralités. Outillage, matériaux. De la peinture. Nomenclature et explication des principaux termes techniques de peinture.

Vitrerie : Généralités. Outillage, matériaux. Tenture. Extrait d'un devis et cahier des charges. Travaux de peinture, de vitrerie et de tenture.

FUMISTERIE, CHAUFFAGE ET VENTILATION, par E. Aucamus, ingénieur des arts et manufactures, chef d'atelier à la Compagnie des chemins de fer du Nord. Gr. in-16 de 290 pages avec 213 fig..... 10 fr.

Fumisterie : Généralités. Matériaux et outillage. Travaux de fumisterie. Ordonnances et règlements.

Chauffage : Considérations théoriques. Cheminées d'appartements. Poêles. Chauffage au gaz d'éclairage. Calorifères. Chauffage continu par l'air chaud. Chauffage par l'eau chaude. Chauffage par la vapeur. Calculs relatifs à l'établissement d'un projet de chauffage.

Ventilation : Ventilation naturelle. Ventilation par cheminée chauffée. Ventilation mécanique. Note sur l'acoustique des salles de réunion.

DEVIS ET ÉVALUATIONS DES TRAVAUX PUBLICS ET DES CONSTRUCTIONS CIVILES, par A. Bonnal, ingénieur civil, et E. Dardart, conducteur principal des ponts et chaussées. In-8° de 714 pages avec 87 fig... 15 fr.

Terrassements. Maçonneries. Charpente. Couverture, plomberie, zingage, canalisation, menuiserie, serrurerie, quincaillerie. Peinture, goudronnage, vitrerie, miroiterie, dorure, tenture. Fumisterie, marbrerie, stuc. Empierrements, pavage, granit, asphalte et bitume. Locomotive et matériel roulant. Voie. Chauffage, éclairage, graissage, vidange, désinfection. Devis divers. Transport des matériaux de construction. Conditions d'exécution des travaux publics. Métrés des ouvrages et exemples d'établissement de prix de revient.

AGRICULTURE, par F. Pradès, ancien conducteur des ponts et chaussées, rédacteur au Ministère de l'Agriculture. Gr. in-16 de 423 pages avec 90 fig..... 9 fr.

Météorologie et climatologie agricoles. Géologie agricole. Physiologie végétale. Instruments et procédés d'agriculture. Amendements et engrais. Cultures diverses. Viticulture. Sylviculture.

HYDRAULIQUE AGRICOLE, par P. Lévy-Salvador, ingénieur des constructions civiles, attaché à la direction de l'hydraulique agricole au Ministère de l'Agriculture. Ouvrage médaillé par la Société nationale d'Agriculture de France.

Tome I^er^. — Cours d'eau non navigables ni flottables. Gr. in-16 de 483 pages avec 171 fig. et 6 pl..... 12 fr.

RÉGLEMENTATION DES PRISES D'EAU SUR COURS D'EAU NON NAVIGABLES NI FLOTTABLES : Généralités. Dispositions générales des prises d'eau d'usines. Dispositions particulières des ouvrages de retenue et de décharge. Exemple de la réglementation d'un barrage d'usine. Réglementation des barrages dans des conditions spéciales. Opérations et études nécessitées par la réglementation des usines. Récolement des ouvrages. Revision des reglements. Réglementation des barrages d'irrigation et de submersion.

ENTRETIEN ET AMÉLIORATION DES COURS D'EAU NON NAVIGABLES NI FLOTTABLES : Considérations générales sur les cours d'eau. Curages. Faucardements. Suppression des obstacles à l'écoulement des eaux. Endiguements. Défenses des rives. Annexes.

Tome II. — Des irrigations. Gr. in-16 de 668 pages avec 459 fig. et 18 pl.. ..... 15 fr.

IRRIGATIONS : Généralités. Mode d'établissement des canaux d'irrigation. Des prises d'eau. Ouvrages d'art. Ouvrages d'art exceptionnels et spéciaux. Des barrages-réservoirs. Des lacs-réservoirs. Des appareils élévatoires. Des canaux secondaires et rigoles d'arrosage. Etude du réseau de distribution. Distribution des eaux des canaux d'irrigation. Utilisation de l'eau par les intéressés. Concession et administration des canaux d'irrigation. Annexes.

Tome III et dernier. — Assainissements et desséchements. Colmatage. Polders, drainage, utilisation agricole des eaux d'égout. Annexes. Gr. in-16 de 563 pages avec 279 fig. et 2 pl..... 15 fr.

ASSAINISSEMENT ET DESSÉCHEMENTS : Généralités. Législation des travaux d'assainissement et de desséchement. Travaux d'assainissement agricole. Généralités sur les travaux de desséchement. Travaux de desséchement par écoulement continu. Travaux de desséchement par écoulement discontinu. Travaux de desséchement par élévation mecanique.

COLMATAGES : Généralités. POLDERS : Généralités. DRAINAGES : Généralités. Systèmes divers de drains. Projets de drainage. Exécution des travaux de drainage, drainages spéciaux. Législation du drainage. Utilisation agricole des eaux d'egout.

GÉNIE RURAL. Constructions rurales et machines agricoles, par J. Philbert, conducteur au service de l'assainissement de la Ville de Paris, suivi de l'**Art du géomètre rural,** par O. Roux, conducteur faisant fonctions d'ingénieur des ponts et chaussées. Ouvrage médaillé par la Société nationale d'agriculture de France. Gr. in-16 de 422 pages avec 331 fig..... 10 fr.

CONSTRUCTIONS RURALES : Habitations. Logements des animaux. Logements des recoltes et des produits. Annexes de la ferme. Dispositions générales des fermes. MACHINES AGRICOLES : Machines pour la preparation du sol. Machines pour les travaux de recolte. Appareils de transport. Machines pour l'egrenage et le nettoyage des grains. Moteurs utilisés en agriculture. Preparation des grains en vue de la consommation. Préparation des fourrages. Préparation des racines et des tubercules. Appareils de laiteries, beurreries et fromageries. Machines employées pour la fabrication du vin et du cidre. Machines pour la préparation des engrais et instruments de pesage. ART DU GÉOMÈTRE RURAL : Généralités. Formulaires.

ÉLECTRICITÉ, par E. Dacremont, conducteur des ponts et chaussées, chef de section au service technique municipal de la Ville de Paris. Ouvrage médaille par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale.

Première partie. Théorie et production. Gr. in-16 de 500 pages avec 276 fig..... 12 fr.

Notions préliminaires. Etude générale des phénomènes électriques : *Condenseurs, énergie du courant électrique.* Piles thermo-électriques. Piles hydro-électriques. Magnétisme : *Électro-magnétisme, induction électro-magnétique.* Courants alternatifs. Machines dynamo-électriques à courants alternatifs ou alternateurs. Machines dynamo-électriques à courant continu. Transformateurs. Accumulateurs. Méthodes et appareils de mesures électriques.

Deuxième partie. Applications industrielles. Gr. in-16 de 635 pages avec 321 fig..... 12 fr.

Canalisation et distribution. Eclairage électrique. Transport électrique de l'énergie. Traction électrique. Electrochimie. Télégraphie. Téléphonie. Appareils enregistreurs. Projet de distribution d'énergie électrique dans une ville de 50.000 habitants.
Lois et règlements émanant de pouvoirs.

PHOTOGRAPHIE, par F. Miron, ingénieur, licencié ès sciences physiques. Gr. in-16 de 437 pages avec 154 fig..... 9 fr.

Propriétés physiques et chimiques de la lumière. Action de la lumière sur les couches photographiques. Le laboratoire et l'atelier. L'appareil photographique : *Mise au point. Temps de pose.* Procédés négatifs. Procédé sec au gélatino-bromure d'argent. Clichés pelliculaires. Préparations orthochromatiques. Matériel pour procédés positifs. Epreuves positives par transparence. Epreuves positives par réflexion. Epreuves positives indirectes par réflexion. Les procédés aux bichromates alcalins. La photographie des couleurs. Emaux photographiques. Procédés divers, retouches, tirage, montage et peintures des épreuves. Applications diverses. Les impressions photographiques aux encres grasses. Applications de la photographie aux levés de plans. Appendice.

GÉNIE. Ses travaux spéciaux, ses services annexes, par O. Roux. Gr. in-16 de 508 pages avec 371 fig. et 1 pl. en couleur..... 12 fr.

Droits et devoirs des officiers. Les services de l'arme du génie et ceux qui s'y rattachent : Etat-major particulier du génie. Les troupes du génie. Les services annexes. Les travaux spéciaux : Généralités Fortification permanente et fortification semi-permanente. Fortification passagère. Défenses accessoires. Organisation défensive des obstacles du terrain. Sapes. Mines. Ponts militaires.

SCIENCES ET ARTS MILITAIRES, par Em. Dardart, sous-ingénieur des ponts et chaussées, et le capitaine X., de l'infanterie coloniale. Gr. in-16 de 672 pages avec 400 fig..... 12 fr.

Organisation militaire. Recrutement de l'armée en France. Allemagne, Russie, Autriche-Hongrie, Italie. Recrutement des cadres. Organisation des forces militaires de la France (armée métropolitaine, armée coloniale, armée de mer). Organisation des armées étrangères. Tactique. Marches. Stationnement. Service de sûreté. Combat offensif et défensif. Formation des différentes armes : infanterie, cavalerie, artillerie. Artillerie : personnel, établissements. Balistique intérieure et extérieure. Organisation des armes à feu. Bouches à feu. Armes portatives. Munitions des bouches à feu et des armes portatives. Pointage. Tir d'artillerie. Tir d'infanterie. Matériel d'artillerie de campagne, de montagne, de siège et de place, de côte. Tourelles cuirassées. Armes portatives françaises, allemandes, austro-hongroises, italiennes et russes. Fabrication des armes : bouches à feu, armes portatives. Fabrication des substances explosives, des cartouches, des munitions pour bouches à feu. Artilleries étrangères. Mitrailleuse Maxim. Transport à la suite des armées. Train des équipages. Transports du service de l'artillerie et de l'intendance Transports du service de la trésorerie et des postes. Transports du service de santé. Droit militaire. Droit de la guerre.

Tours. — Imprimerie Deslis Frères.

89080446909

B89080446909A

SDK
.M89